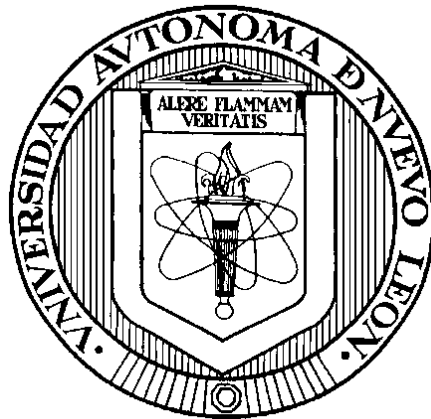


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**CERÁMICA TRADICIONAL CON TECNOLOGÍA DE AUTO-LIMPIEZA**

**POR**

**ING. MAGALY YAJAIRA NAVA NÚÑEZ**

**Como requisito parcial para obtener el grado de**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS, con orientación en**

**Ingeniería Ambiental**

**Julio 2015**

# **TESIS DE MAESTRÍA**

## **Cerámica tradicional con tecnología de auto-limpieza**

---

**DRA. MARÍA ELVIRA ZARAZÚA MORÍN**

**Director de Tesis**

---

**DR. ISAÍAS JUÁREZ RAMÍREZ**

**Co-Director de Tesis**

---

**DR. JUAN JACOBO RUIZ VALDÉS**

**Evaluador de Tesis**

---

**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**

**Subdirector de Estudios de Posgrado**



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

**FIC**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.

**Presente.-**

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

Por este medio le comunico que la estudiante Ing. Magaly Yajaira Nava Núñez, pasante de la Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, ha concluido satisfactoriamente su trabajo de tesis denominado **“Cerámica tradicional con tecnología de auto-limpieza”**, por lo que no tengo inconveniente en solicitarle que amablemente gire las instrucciones para dar paso a los trámites correspondientes y atender la solicitud del Examen de Grado de la Ing. Nava Núñez para cumplir con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra Institución.

Agradeciendo de antemano la atención brindada a la presente, me despido quedando a sus órdenes

**ATENTAMENTE**

Ciudad Universitaria 03 de Julio de 2015

**Dra. María Elvira Zarazúa Morín**

Director de tesis



Visión  
2020  
C.C.P. Archivo.

“Educación de clase mundial,  
un compromiso social”

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455  
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443  
<http://www.fic.uanl.mx>



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FIC**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

03 de julio del 2015

**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.**  
**Presente.-**

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis titulado **“Cerámica tradicional con tecnología de auto-limpieza”**, que presenta la Ing. Magaly Yajaira Nava Núñez, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a Usted que he leído y evaluado la calidad de la tesis, y mi dictamen es que el documento cumple con los requisitos para ser APROBADO.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

---

**Dr. Isaías Juárez Ramírez**  
Evaluador

C.c.p. Archivo.



*“Educación de clase mundial.  
un compromiso social”*

Ave. Universidad S/N Ciudad Universitaria  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455  
Tel.: 1442 4400 Fax: 1442 4443  
<http://www.fic.uanl.mx>



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS /Subdirección de Servicios Tecnológicos/Laboratorio de Pruebas e Investigaciones Cerámicas



**DR. CESAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO**  
**SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, U.A.N.L.**  
**Presente.-**

Estimado Dr. Juárez Alvarado:

En atención a su oficio en el que me informa que fui designado como Evaluador de la Tesis titulado **“Cerámica tradicional con tecnología de auto-limpieza”**, que presenta el Ing. Magaly Yajaira Nava Núñez, como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental, me permito informar a Usted que después de haber leído y evaluado la calidad de la tesis, dictamino que la misma es APROBADA.

Sin otro particular, le reitero mis distinguidas consideraciones y un afectuoso saludo.

**ATENTAMENTE**

**Dr. Juan Jacobo Ruiz Valdés**  
Evaluador de Tesis



C.c.p. Archivo.



Visión  
2020  
UANL

Guerrero y Progreso S/N  
Col. Treviño, Monterrey, N.L.  
Tel.: 83 29 40 00 Ext. 3426, 3448  
e-mail: [juan.ruizv@uanl.mx](mailto:juan.ruizv@uanl.mx)



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



**FIC**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Oficio SDEP-262-2015

**ING. LÁZARO VARGAS GUERRA**  
Director del Departamento de Escolar y de  
Archivo de la UANL  
Presente.-

Estimado Ing. Vargas:

Por este conducto me permito comunicarle que la **Ing. Magaly Yajaira Nava Núñez**, pasante de la **Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**, ha solicitado su examen de grado, para lo cual a cubierto la totalidad de los requisitos académicos y administrativos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales y el Reglamento General de Estudios de Posgrado de nuestra Institución. De la manera más atenta, le solicito su colaboración para que se dé el trámite correspondiente en el Departamento a su digno cargo.

Sin más por el momento, quedo a sus apreciables órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE,  
"ALERE FLAMAM VERITATIS"  
Cd. Universitaria a 03 de julio del 2015

**DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ÁLVARADO**  
Subdirector de Estudios de Posgrado



SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO

C.c.p. Archivo.  
Rtp.



"Educación de clase mundial,  
un compromiso social"

FO-SDP-01

Ave. Universidad S/N, Cd. Universitaria, Apdo. Postal 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tel.: (01-81) 1442 4400 Ext.: 4447 y 4448  
Conm.: (01-81) 8329 4000 Ext.: 7216 y 7234  
<http://fic.uanl.mx>



**UANL**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

COMPROBANTE DE CORRECCIÓN

Tesista: MAGALY YAJAIRA NAVA NÚÑEZ

Tema de la tesis: CERÁMICA TRADICIONAL CON TECNOLOGÍA  
DE AUTO-LIMPIEZA

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA

Del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográfico,  
metodológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

Nombre y firma de quien corrigió:

Arq. Ramón Longoria Ramírez

DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Ciudad Universitaria, a 22 de JUNIO de 2015

Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17  
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450  
Tels.: (81) 14424400 ext. 4447 y 4448, 83294000 ext. 7216,7234  
Http://fic.uanl.mx/  
Correo:subpos@uanl.mx

FO-SEP-01



## **RESUMEN**

**Tesista:** Magaly Yajaira Nava Núñez      **Fecha de graduación:** Julio de 2015

**Maestría:** Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil

**Título del estudio:**      Cerámica tradicional con tecnología de auto-limpieza

**Número de páginas:** 145      **Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Orientación en Ingeniería Ambiental**

**Propósito y método del estudio:** La fotocatalisis heterogénea se ha estudiado intensamente en los últimos años ya que sólo requiere energía fotónica (luz solar) para activar la conversión química. El progreso de las investigaciones ha permitido la incorporación de fotocatalizadores, en su mayoría dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) o compuestos con base en este óxido, a los materiales cementantes, para lograr propiedades de autolimpieza y la eliminación de contaminantes en el aire. La ventaja de utilizar luz solar y agua de lluvia como fuerza impulsora ha permitido la innovación de materiales de construcción fotocatalíticos respetuosos para el medio ambiente. En este trabajo se probaron diversos materiales cementantes impregnados con SiC- $\text{TiO}_2$  como fotocatalizador, para llevar a cabo la degradación fotocatalítica de Rodamina B y la reducción de  $\text{CO}_2$  en solución acuosa y fase gas. La depositación del SiC- $\text{TiO}_2$  sobre morteros preparados con cemento blanco y cemento gris se realizó mediante la técnica de doctor Blade. Una vez impregnadas las muestras de mortero se llevó a cabo la caracterización por Difracción de rayos X (DRX) para la identificación de las fases cristalinas. La morfología fue determinada por Microscopia electrónica de barrido (MEB). Los valores de banda prohibida ( $E_g$ ) se determinaron por Espectroscopia de Uv-Vis y el área superficial ( $S_{\text{BET}}$ ) por fisisorción de



nitrógeno. Una vez caracterizados los morteros, se evaluó su actividad en las reacciones de degradación fotocatalítica de Rodamina B en solución, con una concentración de 5 ppm. Se utilizaron tres diferentes fuentes de energía (lámpara de luz UV con una longitud de onda de 254 nm, simulador solar equipado con una lámpara de Xenón de 450 W, y luz solar natural). Todos los experimentos fueron expuestos a irradiación durante 8 horas. La actividad fotocatalítica para la reducción de  $\text{CO}_2$  se determinó haciendo pasar  $\text{CO}_2$  a diferentes presiones por un reactor tipo Batch, que contenía agua y el mortero con SiC-TiO<sub>2</sub>. Como fuente de irradiación se utilizó una lámpara de luz UV de 254 nm. La reacción de reducción de  $\text{CO}_2$  se siguió durante 6 horas analizando el producto obtenido por la técnica de espectroscopia de UV-Vis y cromatografía de gases.

**Contribuciones y Conclusiones:** Mediante los ensayos realizados se pudo comprobar que fue posible la obtención de materiales cementantes con propiedades de autolimpieza al recubrir su superficie con fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub>. Todas las muestras presentaron actividad en la degradación de la Rodamina B, siendo las muestras irradiadas con simulador solar las que presentan mayor porcentaje de degradación. Se encontró que es posible llevar a cabo la reducción de  $\text{CO}_2$  al emplear las muestras de mortero gris y blanco recubiertas con SiC-TiO<sub>2</sub> en fase acuosa y fase gas, obteniendo como sub-productos de esta reacción metanol y metano.

**FIRMA DEL ASESOR:** \_\_\_\_\_

## DEDICATORIA

**A ti mi bebé, pequeño ser lleno de amor incondicional, a ti te dedico lo que he logrado hasta el día de hoy, porque eres tú el motor que me inspira a ser mejor cada día, gracias, mi pequeño por soportar mis ausencias sin duda sé que un día comprenderás que todo eso valió la pena.**

**A mi madre, porque no había día que no creyera que podía lograrlo, gracias mamá porque eres tú quien ha forjado en mi ese carácter de triunfadora.**

**A mi abuelita, por ser ese ser maravilloso que le da a mi vida sentido de bondad, porque siempre me pone en manos de Dios para que logre mis metas.**

**A Roberto, por todo lo vivido, por tu apoyo incondicional, porque a pesar de mil vivencias, estás aquí apoyándome en todo momento.**

**A mi padre, por todo su apoyo, porque me ha enseñado a ganarme la vida trabajando honradamente porque no necesito palabras para saber cómo debo actuar, me basta su ejemplo para seguir adelante.**

**A mi hermana Faby y mi pequeña Susy. Gracias por ser mi compañía, durante este tiempo, por su cariño y por permitirme compartir un poco de lo mucho que Dios me ha dado con ustedes.**

A mi abuelito mi viejito sé que físicamente ya no pudiste ver este logro más en mi vida pero sé que desde donde estas sigo siendo tu niña la que te hacía sentir muy orquilloso

## AGRADECIMIENTOS

- *A veces volteo al cielo, sonrío y digo: “Yo sé que fuiste tú”...Gracias Dios...*  
Agradezco infinitamente a Dios por que sin él nada de esto sería posible, porque a pesar de todas mis adversidades y mis pruebas siempre había un mañana para volver a intentarlo y hoy puedo decir hasta aquí me ayudó el Señor.
- A mi familia por amarme y respetarme tal como soy, por ser mi fuente de inspiración. Sé que cada uno de ustedes me ha enseñado algo valioso, que han hecho de mi vida algo maravilloso y me siento muy feliz de tenerlos a mi lado sin ustedes no sería nada pero con ustedes soy todo.
- A mis asesores de tesis, la Dra. Elvira Zarazúa Morín, por todas sus enseñanzas, y por esas veces que supo escucharme y aconsejarme. Al Dr. Isaías Juárez Ramírez por el tiempo dedicado y por su aporte científico en el desarrollo de mi investigación.
- Al Dr. Christian Gómez Solís, por su colaboración, porque sin ser mi asesor fue parte importante en el desarrollo de la tesis.
- Al Dr. Juan Jacobo Ruiz Valdés por su aporte y recomendaciones como revisor de mi tesis.

- Al personal del laboratorio de Ecomateriales y Energía del Instituto de Ingeniería Civil FIC-UANL en particular a la Dra. Leticia M. Torres Guerra, Jefa del Departamento, por todo el apoyo otorgado en la realización de mi proyecto.
- Al personal del laboratorio de Materiales de Construcción por la facilidad otorgada para la realización de mis ensayos; en especial, al Sr. Gumaro Tovar, por su disponibilidad para apoyarme.
- Al personal del departamento de Ingeniería y Química de Materiales, del CIMAV-Chihuahua a cargo del Dr. Alfredo Aguilar Elguezabal por su colaboración en la realización de las pruebas de reducción de CO<sub>2</sub> fase gas.
- Al personal del grupo de Química Coloidal e Interfacial Aplicada a Materiales, CIMAV-Monterrey dirigido por la Dra. Margarita Sánchez Domínguez por el apoyo brindado en la realización de la síntesis de los materiales del SiC-TiO<sub>2</sub>.
- Al personal de la biblioteca de posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil por su disponibilidad para la consulta del acervo bibliográfico.
- A la Subdirección de Estudios de Posgrado de la FIC-UANL, a cargo del Dr. Cesar A. Juárez Alvarado.
- Al CONACYT por la beca otorgada a mi persona para la realización de mis estudios de maestría, número de becario 359908 y también por el apoyo financiero al proyecto CB-168730.

- A mis amigas Rosa y Ana por haberme otorgado su amistad, en verdad las llevare siempre en mi recuerdo. Gracias porque son pocas las personas que logran marcar mi vida y ustedes lo lograron, chicas. Gracias por haber estado ahí cuando las necesité, por escucharme, por cada uno de sus consejos que me motivaban a no rendirme.

## Contenido

## Página

CAPITULO 1. INTRODUCCION .....	1
1.1. Aspectos generales .....	1
1.2. La tecnología de fotocátalisis .....	3
1.3. Los materiales cementantes.....	5
1.4. Tecnología de fotocátalisis en materiales cementantes. ....	9
1.4.1. Degradación de colorantes .....	12
1.4.2. Degradación de NO <sub>x</sub> .....	15
1.4.3. Reducción de CO <sub>2</sub> .....	17
1.5. Áreas de oportunidad en la tecnología de fotocátalisis empleando materiales cementantes.....	20
1.6. Justificación .....	23
1.7. Objetivo general .....	25
1.8. Objetivo particulares.....	26
1.9. Hipótesis.....	28
CAPITULO 2. EXPERIMENTAL .....	29
2.2. Síntesis del compuesto SiC-TiO <sub>2</sub> por el método de microemulsión.....	30
2.2. Preparación de especímenes de mortero.....	33
2.3. Preparación de las muestras de mortero.....	36
2.4. Preparación de la pasta empleada para los recubrimientos fotocatalíticos.....	37
2.5. Depósito de recubrimientos sobre los morteros.....	38

2.6. Caracterización.....	40
2.6.1. Difracción de rayos X. ....	40
2.6.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	42
2.6.3. Espectros de reflectancia difusa para la determinación del $E_g$ . ....	43
2.6.4. Área superficial (BET). ....	44
2.6.5. Determinación de las estructuras de bandas, mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) .....	45
2.7. Degradación del colorante Rodamina B. ....	47
2.7.1. Prueba de fotólisis. ....	47
2.7.2. Pruebas de adsorción.....	48
2.7.3. Pruebas de degradación fotocatalítica bajo luz solar simulada. ....	49
2.7.4. Pruebas de degradación fotocatalítica en el sol. ....	51
2.7.5. Pruebas de degradación fotocatalítica con luz UV. ....	52
2.8. Pruebas fotocatalíticas de reducción de $\text{CO}_2$ en fase acuosa. ....	52
2.9. Pruebas fotocatalíticas de reducción de $\text{CO}_2$ en fase gas.....	55
CAPITULO 3. RESULTADOS.....	57
3.1. Caracterización del compuesto $\text{SiC-TiO}_2$ . ....	57
3.1.1 Difracción de rayos X del compuesto $\text{SiC-TiO}_2$ . ....	57
3.1.2. Análisis de microscopía electrónica de barrido del $\text{SiC-TiO}_2$ .....	59
3.1.3. Determinación de ancho de banda prohibida de $\text{SiC-TiO}_2$ . ....	60
3.1.4. Determinación de área superficial ( $S_{bet}$ ) del $\text{SiC-TiO}_2$ . ....	62
3.2 Preparación y propiedades de los morteros de cemento gris y cemento blanco: porosidad y resistencia a la compresión .....	63
3.3. Caracterización estructural, morfológica y fisicoquímica de los morteros de cemento gris con recubrimiento de $\text{SiC-TiO}_2$ .....	66

3.3.1 Difracción de rayos X de morteros de cemento gris con recubrimientos del SiC-TiO <sub>2</sub> . .....	66
3.3.2 Análisis de microscopía electrónica de barrido de morteros de cemento gris recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> . .....	67
3.3.3. Espesor del recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> en mortero de cemento gris. ....	69
3.3.4. Determinación del ancho de banda prohibida de morteros de cemento gris recubierto con SiC- TiO <sub>2</sub> . ....	71
3.3.5. Área superficial del mortero de cemento gris con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	72
3.4. Caracterización estructural, morfológica y fisicoquímica de los morteros de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	74
3.4.1 Difracción de rayos X de morteros de cemento blanco con recubrimientos de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	74
3.4.2. Análisis de microscopía electrónica de barrido de mortero blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	75
3.4.3. Espesor del mortero blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	78
3.4.4. Determinación del ancho de banda prohibida del mortero de cemento blanco con recubierto de SiC- TiO <sub>2</sub> . ....	79
3.4.5. Área superficial del mortero de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	80
3.5. Determinación de estructura de bandas del SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	81
3.6. Desempeño fotocatalítico en la degradación de rodamina B de las muestras de mortero gris y mortero blanco recubiertas con pastas de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	85
3.6.1. Irradiación con simulador solar. ....	86
3.6.2. Irradiación con luz solar natural. ....	90
3.6.3. Irradiación con luz UV. ....	93



3.6.4. Evolución de los espectros de absorción de la rodamina B durante la reacción fotocatalítica.....	98
3.6.5. Parámetros cinéticos de las reacciones de degradación de rodamina B bajo irradiación de luz. ....	101
3.6.6. Mecanismo de degradación fotocatalítica de los morteros gris y blanco con recubrimiento SiC-TiO <sub>2</sub> sobre la rodamina B. ....	104
3.7. Desempeño fotocatalítico de la reducción CO <sub>2</sub> de las muestras de mortero gris y mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> .....	107
3.7.1. Producción de metanol en solución acuosa. ....	110
3.7.2. Efecto de la presión.....	115
3.7.3. Efecto del pH.....	117
3.7.4. Evidencia de la presencia de metanol por cromatografía de gases. ....	120
3.7.5. Pruebas de reproducibilidad.....	121
3.7.6. Producción de metano en fase gas. ....	122
3.7.8. Mecanismo de la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> . ....	123
CAPITULO 4. CONCLUSIONES .....	129

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de fotocátalisis heterogénea .....	5
Figura 2. Ejemplos relevantes de edificios que han empleado materiales cementantes fotocatalíticos .....	11
Figura 3. Ajuste del pH en la reacción de microemulsión .....	32
Figura 4. Materia prima para la preparación de especímenes de mortero.....	33
Figura 5. Preparación de la mezcla de morteros, con una relación agua/cemento de 0.485.....	34
Figura 6. Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo. Modificada de la Norma ASTM C109/C109M .....	35
Figura 7. Especímenes de mortero después del curado.....	36
Figura 8. Depósito de películas por la técnica Doctor Blade.....	39
Figura 9. Depósito de películas por la técnica Doctor Blade.....	40
Figura 10. Celda electroquímica de tres electrodos.....	46
Figura 11. Molécula orgánica de rodamina B .....	47
Figura 12. Simulador solar empleado en pruebas fotocatalíticas con luz simulada. ....	50
Figura 13. Reactor fotocatalítico equipado empleado en las pruebas de reducción de CO <sub>2</sub> .....	54
Figura 14. Reactor de ventana de cuarzo y saturador de humedad. ....	56
Figura 15. Difractograma de SiC-TiO <sub>2</sub> sintetizado por microemulsión. ....	59
Figura 16. Micrografías de MEB a diferentes magnificaciones de: a) SiC comercial, b) SiC-TiO <sub>2</sub> sintetizado por microemulsión. ....	60
Figura 17. Espectros de UV-Vis del compuesto SiC-TiO <sub>2</sub> .....	61
Figura 18. Pruebas mecánicas de resistencia a la compresión de muestras de mortero gris y mortero blanco .....	65
Figura 19. Difractograma de morteros gris recubiertos con pastas de SiC-TiO <sub>2</sub> . .....	67

Figura 20. a) Micrografías de MEB de mortero gris con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> b) tamaño de partículas de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	68
Figura 21. EDS de mortero gris con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	68
Figura 22. a) Micrografías MEB de mortero gris sin recubrir b) EDS de mortero gris sin recubrir. ....	69
Figura 23. Micrografías MEB de espesor mortero gris con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	70
Figura 24. Espectros de UV-Vis de morteros recubiertos con SiC- TiO <sub>2</sub> . ....	71
Figura 25. Difractograma de mortero blanco recubiertos con pastas de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	75
Figura 26. Micrografías MEB de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	76
Figura 27. EDS de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	76
Figura 28. a) Micrografías MEB de mortero blanco sin recubrimiento b) EDS mortero blanco sin recubrimiento. ....	77
Figura 29. Micrografías MEB de espesor de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	78
Figura 30. Espectros de UV-Vis de mortero blanco recubierto con SiC- TiO <sub>2</sub> . .	79
Figura 31. Diagrama de Nyquist de los fotocatalizadores SiC y TiO <sub>2</sub> . ....	82
Figura 32. Circuito equivalente Randles, donde R <sub>s</sub> representa la resistencia de la solución electrolítica, R <sub>ct</sub> la resistencia a la transferencia de carga y C <sub>dl</sub> la capacitancia a la doble capa. ....	83
Figura 33. Diagramas de M-S obtenidos a diferentes potenciales para SiC y TiO <sub>2</sub> . ....	84
Figura 34. Estructura de bandas para los fotocatalizadores SiC y TiO <sub>2</sub> . ....	85
Figura 35. Espectro de absorción para la solución de Rodamina B sin irradiar.	86
Figura 36. Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con simulador solar. ....	88
Figura 37. Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con simulador solar. ....	89

Figura 38. Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz solar natural.....	92
Figura 39. Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz solar natural.....	92
Figura 40. Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz UV. ....	94
Figura 41. Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz UV. ....	94
Figura 42. Decoloración de Rodamina B en mortero gris y blanco recubierto con SiC-TiO <sub>2</sub> en un periodo de 24 horas de irradiación con luz UV .....	96
Figura 43. Espectro de absorción de la muestra de mortero gris irradiada bajo luz solar simulada. ....	99
Figura 44. Espectro de absorción de la muestra de mortero blanco irradiada bajo luz solar simulada. ....	100
Figura 45. Ajuste lineal del experimento muestra de mortero gris irradiado con simulador solar.....	102
Figura 46. Diagrama esquemático de la representación del mecanismo de fotocátalisis utilizando morteros gris y blanco recubiertos con SiC-TiO <sub>2</sub> como fotocatalizador.....	106
Figura 47. Alineación de la energía de banda del SiC y del TiO <sub>2</sub> y los diferentes potenciales de reducción de CO <sub>2</sub> .....	109
Figura 48. Prueba de fotólisis de la reacción de reducción de CO <sub>2</sub> .....	110
Figura 49. Espectro de absorción de UV-Vis de metanol de mortero de cemento gris. ....	111
Figura 50. Espectro de absorción de UV-Vis de metanol de mortero de cemento blanco. ....	112
Figura 51. Porcentajes de conversión de CO <sub>2</sub> a metanol calculada, a partir de la curva de calibración. ....	113
Figura 52. Cromatograma de mortero de cemento blanco empleado en la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> .....	114

Figura 53. Efecto de la presión en la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.....	116
Figura 54. Efecto del pH en la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.....	118
Figura 55. Efecto de la temperatura en la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.....	119
Figura 56. Diagrama de solubilidad de CO <sub>2</sub> en agua a diferentes temperaturas .....	120
Figura 57. Cromatograma de mortero de cemento blanco empleado en la reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> variación presión, pH y temperatura. ....	121
Figura 58. Pruebas de reproducibilidad de reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.....	122
Figura 59. Reducción de CO <sub>2</sub> a metano en fase gas.....	123
Figura 60. Mecanismo de reducción fotocatalítica del CO <sub>2</sub> .....	125

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de cementos Portland. ....	8
Tabla 2. Antecedentes de autolimpieza de degradación fotocatalítica de Rodamina B en materiales cementantes. ....	12
Tabla 3. Posibles productos obtenidos de las reacciones de reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> . ....	18
Tabla 4. Estudios previos de reducción fotocatalítica de CO <sub>2</sub> .....	19
Tabla 5. Dosificación de los materiales para la elaboración de los morteros....	33
Tabla 6. Valores de Eg de los materiales estudiados. ....	62
Tabla 7. Valores de porosidad de las muestras de mortero gris y mortero blanco antes y después del recubrimiento. ....	64
Tabla 8. Propiedades ópticas UV-Vis de los materiales empleados .....	72
Tabla 9. Valores de área superficial $S_{BET}$ del SiC-TiO <sub>2</sub> y morteros de cemento gris con y sin recubrimiento. ....	73
Tabla 10. Propiedades ópticas UV-Vis de los materiales empleados. ....	80
Tabla 11. Valores Área superficial $S_{BET}$ del SiC-TiO <sub>2</sub> y morteros de blanco. ....	81
Tabla 12. Porcentajes de decoloración de Rodamina B expuestas a irradiación solar simulada.....	88
Tabla 13. Porcentajes de degradación de rodamina B expuestas a irradiación solar natural. ....	91
Tabla 14. Porcentajes de decoloración de Rodamina B expuestas a luz UV. ..	95
Tabla 15. Comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos reportados.....	97
Tabla 16. Parámetros cinéticos de los datos experimentales de morteros gris y blanco con recubrimientos de SiC-TiO <sub>2</sub> . ....	104

---

## **CAPITULO 1. INTRODUCCION**

### **1.1. Aspectos generales**

La contaminación ambiental es un problema muy grave que afecta a nuestro planeta y está directamente relacionada con la manera en que los seres humanos desarrollan sus actividades económicas, políticas y sociales. En la realización de dichas actividades se generan grandes cantidades de contaminantes orgánicos e inorgánicos que terminan alterando los mantos acuíferos, las tierras de cultivo y el aire de la atmósfera. Por lo anterior, la contaminación del agua, el suelo y el aire es uno de los retos que la sociedad actual está enfrentando [1]. En años recientes, las investigaciones científicas y tecnológicas basadas en aspectos tales como purificación del agua, del aire, la reducción de contaminantes y la obtención de energías más limpias están teniendo un aumento considerable [2-5].

En lo que respecta al agua contaminada ésta puede ser tratada por técnicas de remediación convencionales, como tratamientos biológicos, adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, tratamientos químicos como oxidación térmica, cloración, ionización, etc. [6,7]. Por otro lado, recientemente el uso de tecnologías avanzadas de oxidación ha cobrado gran importancia por su efectividad al emplearse como métodos complementarios

---

---

para lograr la total purificación del agua. Entre estos métodos destacan la fotocatalisis heterogénea y el proceso fotofentón. Del mismo modo en lo que respecta al abatimiento de la contaminación del aire, se han empleado tanto tecnologías convencionales como avanzadas; como son, el uso de filtros electrostáticos y membranas para reducir las partículas finas y los procesos catalíticos para purificar el aire de contaminantes peligrosos como SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> y compuestos orgánicos volátiles (COVs) [8]. En el caso de la limpieza del suelo, una de las tecnologías más empleadas es la remediación a través de la recolección y encapsulamiento de desechos sólidos; sin embargo, las exigencias medioambientales son cada vez más rigurosas, por lo que en algunos de los casos estos procedimientos resultan aún inadecuados para alcanzar los niveles establecidos por las legislaciones ambientales.

Una de las técnicas avanzadas que recientemente ha sido empleada por su versatilidad y efectividad es la fotocatalisis heterogénea, que permite la eliminación de contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos, presentes en el agua y en el aire. Esta técnica forma parte de los llamados procesos avanzados de oxidación (PAOS) [9,10], y ofrece la gran ventaja de ser altamente amigable con el medio ambiente; ya que sólo requiere un material semiconductor y luz solar para activarse, lo que representa un ahorro considerable de energía eléctrica [11].

Desde hace varios años esta tecnología abrió el camino para numerosos estudios y patentes destinadas a la utilización de semiconductores empleados en diversos dispositivos para la limpieza del medio ambiente; entre los que se

---



---

pueden mencionar los reactores para purificación de agua y purificadores de aire; sin embargo, la necesidad de comprender el mecanismo de la reacción fotocatalítica, así como extender la aplicación de esta tecnología a otros campos, han obligado a la realización de investigaciones que involucren el uso de materiales semiconductores en otras áreas, como es el caso de los materiales cementantes, donde se busca obtener nuevos materiales con propiedades de auto-limpieza, desinfección y purificación, tanto del agua como del aire, y que puedan emplearse en la construcción de edificaciones sustentables [12-14].

## **1.2. La tecnología de fotocátalisis**

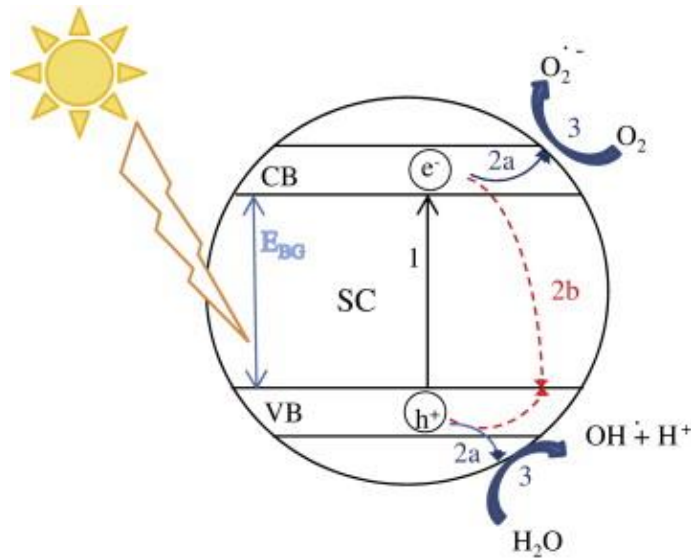
La fotocátalisis heterogénea puede llevarse a cabo en diversos medios, como son: fase gaseosa, fase líquida o fase sólida, [15]. La fotocátalisis heterogénea es un proceso que consiste en el empleo de un material semiconductor capaz de absorber energía igual o superior a su ancho de banda prohibida, [16] el que deberá generar los pares hueco-electrón y la migración de éstos a la superficie del catalizador, para permitir que ocurran las reacciones químicas de oxidación-reducción. Estas reacciones inducen la formación de agentes altamente oxidantes, que reaccionan con los agentes nocivos acelerando los procesos de oxidación y provocando la degradación de las especies tóxicas, orgánicas e inorgánicas, presentes en el medio ambiente.

---

En general, el proceso global de fotocátalisis bajo irradiación puede explicarse en 4 pasos [4]:

- Absorción de la luz ,
- separación del par hueco-electrón
- adsorción de los contaminantes
- reacción redox entre las especies par hueco-electrón

En la figura 1 se muestra, en detalle, el proceso de fotocátalisis, donde puede apreciarse cómo un semiconductor fotocatalítico, al ser irradiado absorbe fotones con energía de igual o mayor intensidad a su ancho de banda prohibida ( $E_g$ ), permitiendo así el transporte de electrones de la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC), lo cual genera el par hueco-electrón [17]. Los huecos foto-generados en la banda de valencia reaccionan con las moléculas de agua adsorbidas formando radicales hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), los huecos y los radicales hidroxilo oxidan las moléculas cercanas a la superficie del fotocatalizador. Mientras tanto los electrones que emigran a la banda de conducción participan en los procesos de reducción del oxígeno ( $\text{O}_2$ ) adsorbido y/o disuelto para formar el radical superóxido ( $\text{O}_2\bullet^-$ ) [18].



**Figura 1.** Esquema del proceso de fotocatalisis heterogénea

### 1.3. Los materiales cementantes

Los materiales cementantes se consideran de gran importancia en la industria de la construcción por sus características aglomerantes, que brindan resistencia mecánica a las edificaciones. Éstos han representado desde tiempos antiguos la unión y estabilidad para que las civilizaciones subsistan. Desde la época de las cavernas, el hombre utilizaba los materiales que consideraba adecuados para conformar su vivienda, sin saber que estaba sentando las bases de la función que deberían tener los materiales cementantes en el futuro. Los primeros en desarrollar edificaciones utilizando un material cementante fueron los egipcios, que desarrollaron increíbles construcciones que se conservan aún, y que fueron hechas con bloques y losas de piedra unidas por una mezcla de arena y una materia cementosa.

---

Posteriormente, en la época romana, se desarrollaron edificaciones con materiales puzolánicos los que en combinación con caliza, arena y agua producían un mortero con gran resistencia, capaz de soportar la acción del agua, dulce o salada.

En la actualidad, los materiales cementantes empleados se basan principalmente en el uso del cemento Portland [19], que es el producto de la mezcla de la caliza dura calcinada con arcilla, agua y yeso a altas temperaturas. Este material es un polvo muy fino que sirve de unión principal para morteros y concretos que son los materiales de construcción que mayormente se emplean en las edificaciones actuales. Sin embargo, de acuerdo con las necesidades actuales se ha vuelto indispensable realizar estudios de los materiales cementantes para que éstos adquieran nuevas y/o mejores propiedades que les permitan ser empleados como materiales cementantes avanzados para el desarrollo de construcciones sustentables [20]. Tal es el caso de los materiales cementantes traslúcidos, los cementantes de ultra alto desempeño, y los materiales cementantes fotocatalíticos, por mencionar algunos.

El cemento está constituido químicamente por cuatro compuestos principales, que se muestran en la Tabla 1.

---

**Tabla 1.** Compuestos principales del cemento portland.

<b>Compuestos principales del cemento Portland</b>		
<b>Nombre del compuesto</b>	<b>Composición del óxido</b>	<b>Abreviatura</b>
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrita tetracálcica	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

**Fuente:** Tecnología del concreto (Neville, 1999)

Según la norma ASTM C150 [21], los cementos portland se clasifican en cinco tipos, que se mencionan en la Tabla 2:

---

**Tabla 1.** Clasificación de cementos Portland.

<b>CEMENTO PORTLAND NORMA ASTM C150</b>	
TIPO I	Cemento Portland común, apto para toda obra que no requiere cemento con requisitos especiales
TIPO II	Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos con un contenido máximo de 8% de $C_3A$
TIPO III	Cemento Portland de alta resistencia inicial
TIPO IV	Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de 35% de $C_3S$ Y 7% de $C_3A$
TIPO V	Cemento Portland resistente a los sulfatos con un contenido máximo de 5% de $C_3A$ y la suma de $C_4AF+2C_3A$ , menor o igual al 20%.

**Fuente:** Tecnología del concreto (Neville, 1999)

---

#### **1.4. Tecnología de fotocátalisis en materiales cementantes.**

Las superficies de los materiales de construcción formados cemento están constantemente expuestas a la intemperie, lo cual provoca un proceso de deterioro acelerado, debido a la exposición continua a los contaminantes presentes en el medio ambiente [22-24]. La acumulación de sustancias contaminantes de naturaleza orgánica e inorgánica dañan las estructuras que se encuentran expuestas, haciéndoles perder su valor estético y afectando su durabilidad [25]; produciendo además cambios de color en las fachadas de las edificaciones y las estructuras [26]; esto debido a la propia naturaleza físico-química de los materiales de cemento, como son la rugosidad, la porosidad y la composición mineralógica.

Aún y cuando existen diversos métodos de limpieza para para minimizar y controlar los daños ocasionados en las construcciones por la contaminación ambiental, la mayoría de ellos (procedimientos mecánicos, disoluciones químicas o métodos de absorción, entre otros) representan riesgos para los usuarios, y además, ocasionan erosiones y cambios de color en la superficie de los materiales de concreto [27]. Por lo tanto, es necesario el empleo de nuevos materiales cementantes innovadores, eficientes y amigables con el medio ambiente [28].

Por tal motivo, en los últimos años se ha puesto especial interés en el uso de la fotocátalisis heterogénea como una técnica complementaria de remediación ambiental; la que, por sus características, puede ayudar a

---

conservar el aspecto estético de las edificaciones eliminando los contaminantes de su entorno [1] y, al mismo tiempo, reducen los gastos de mantenimiento [29]. Actualmente se cuenta con una gran cantidad de estudios acerca de los materiales cementantes (cemento, morteros, y concretos entre otros), que han sido desarrollados y evaluados para determinar su capacidad de autolimpieza para la purificación del agua y del aire y su acción antibacteriana [30,31]. Estos estudios señalan que los materiales de construcción pueden adquirir la propiedad de auto-limpieza al contar con un fotocatalizador agregado en el proceso de mezclado o por simple recubrimiento [32,33]. La estructura porosa de pastas y/o morteros de cemento y las configuraciones planas de las superficies externas de construcción son adecuadas para la incorporación de los fotocatalizadores, ya que facilitan la exposición de los fotocatalizadores a la luz [34]. Así, de esta forma, al ser irradiado el material fotocatalítico se activa, generándose dos fenómenos fisicoquímicos, la superhidrofilicidad del material y la oxidación de las sustancias adsorbidas [35,36], tal y como ocurre con la materia orgánica responsable de la suciedad en la superficie (hollín, mugre, aceite, colorantes y partículas), organismos biológicos, (algas, bacterias y moho), así como contaminantes del aire ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ) lo cual genera el efecto de autolimpieza esperado en los materiales de construcción [37].

Algunos ejemplos relevantes donde se han empleado materiales de construcción fotocatalíticos son: la Iglesia Dives in Misericordia, Roma, Italia; Ciudad de la Música y de las Bellas Artes, Chambéry, Francia; Estación Central



---

de Policía, Burdeos, Francia, y recientemente el Hospital Manuel Gea González, Ciudad de México [38,39], ver figura 2.



**Figura 2.** Ejemplos relevantes de edificios que han empleado materiales cementantes fotocatalíticos

---

#### 1.4.1. Degradación de colorantes

El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) ha sido añadido a diferentes tipos de materiales de cemento [40], debido a los resultados satisfactorios obtenidos en pruebas de eliminación de compuestos orgánicos en solución acuosa [41-43]. Por tal motivo, la evaluación de las propiedades de auto-limpieza en los materiales de cemento que contienen fotocatalizadores como el  $\text{TiO}_2$ , se han venido realizando mediante ensayos de laboratorio utilizando colorantes orgánicos en solución, como modelo de contaminantes y empleando diferentes fuentes de irradiación como luz UV y luz visible, tal y como se puede apreciar en la tabla 3.

**Tabla 2.** Antecedentes de autolimpieza de degradación fotocatalítica de Rodamina B en materiales cementantes.

Referencia	Tipo catalizador	Material cementante	Tipo de lámpara	Colorante
[44]	$\text{TiO}_2$ Anatasa	Concreto	Lámpara UV	Azul de metileno
[45]	$\text{TiO}_2$ Anatasa, Rutilo	Mortero blanco	Lámpara UV 300 W	Rodamina B
[46]	$\text{TiO}_2$ Anatasa	Mortero y pastas	Lámpara UV 300 W	Rodamina B

Aunque los resultados obtenidos al emplear la tecnología de fotocatálisis en materiales de construcción han sido por demás satisfactorios, en la mayoría de los casos, el material fotocatalizador es comúnmente agregado en forma de

---

polvo; sin embargo, para llevar a la aplicación esta tecnología en edificaciones que ofrezcan las condiciones adecuadas para su auto-limpieza, es necesario que el fotocatalizador añadido esté totalmente expuesto a la irradiación solar, debido a la gran área que ocupan las edificaciones, por lo que es recomendable depositarlo en forma de película en su superficie [44][47].

Desde las primeras investigaciones acerca del empleo de fotocatalizadores en los materiales de construcción, en la década de los 90's, la mayoría de estas investigaciones involucran al fotocatalizador mezclado con el material de cemento y muy pocos trabajos han sido realizados empleando el fotocatalizador como recubrimiento de los materiales de cemento. Tal es el caso de los ensayos desarrollados en 1996 para el diseño de la mezcla de hormigón de la iglesia "Dives in Misericordia", edificada en la ciudad de Roma, Italia. Esta estructura, tan altamente prestigiosa y simbólica, requirió el empleo de un concreto altamente resistente y duradero y que además asegurara la blancura de sus elementos, gracias a las propiedades de auto-limpieza. Los experimentos consistieron en evaluar las propiedades de auto-limpieza en muestras de mortero blanco que contenía 5% de  $\text{TiO}_2$ , los que fueron impregnados con fenantroquina (colorante amarillo). Para la activación del semiconductor se empleó un simulador solar compuesto de 4 lámparas de 400W, con una longitud de onda de 290 nm. La degradación del colorante se siguió mediante la técnica de reflectancia, y después de 8 horas de irradiación se obtuvo una recuperación completa del color blanco de la muestra de mortero [48].

---

Recientemente Ruot et al., [46] reportaron que al agregar 1, 3 y 5% de  $\text{TiO}_2$  (PC-105) a las mezclas de pastas y morteros, se obtienen materiales de cemento capaces de degradar hasta un 70% del colorante Rodamina B (4 ppm) al utilizar pastas de cemento con 1% de  $\text{TiO}_2$ . Estos experimentos se realizaron empleando una lámpara de luz UV de 300 W durante un tiempo de exposición de 30 horas.

De igual manera, Sánchez Díaz et. al., [49] prepararon morteros para la degradación fotocatalítica de Rodamina B, utilizando como fotocatalizadores,  $\text{TiO}_2$  P-25, ZnO, SiC- $\text{TiO}_2$  y SiC-ZnO. Estos materiales fueron mezclados por molienda mecánica en diferentes proporciones, 0.5, 1 y 5% y se utilizó luz solar como fuente de irradiación. En este caso, los mejores resultados de degradación se consiguieron con los morteros que contenían 1% de SiC- $\text{TiO}_2$  y 1% de SiC-ZnO, alcanzando la degradación de 80% de Rodamina B (5 ppm), después de 8 horas de reacción.

Por otra parte, Velázquez et al. [50] evaluaron placas de concreto recubiertas con  $\text{TiO}_2$  mediante dos métodos de soporte: painting-coating y disposición de cemento gris y  $\text{TiO}_2$  Degussa P-25. Los materiales fueron probados en la degradación fotocatalítica del colorante naranja de metilo bajo luz UV con una lámpara de 6 W. La mayor degradación se obtuvo por la muestra impregnada por el método de painting-coating, logrando un 32% de degradación del naranja de metilo (30 ppm).

---

#### 1.4.2. Degradación de NO<sub>x</sub>

Los materiales de cemento con fotocatalizador también han sido empleados para llevar a cabo la degradación de NO<sub>x</sub>. La eliminación de estos óxidos es importante, ya que éstos causan una gran variedad de impactos en la salud y en los ambientes urbanos, además de ser los principales responsables del smog fotoquímico y, junto con los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), provocan la lluvia acida [51,52].

Actualmente las tecnologías de prevención y disminución de las emisiones de NO<sub>x</sub>, incluyen modificaciones al proceso de combustión; sin embargo, en años recientes se ha reportado que la mezcla de un semiconductor con materiales cementantes permite la reducción de contaminantes atmosféricos, tales como los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> a través de la fotocatálisis heterogénea. [53-55]. Bajo irradiación solar, los contaminantes pueden ser atrapados y degradados en las superficies de los materiales. Este proceso de remoción de contaminantes puede activarse mediante la energía natural del sol [56].

Por ejemplo, Folli et al., [38] reportaron la eliminación de NO<sub>x</sub> en pastas de cemento, utilizando TiO<sub>2</sub> (PC-105), 100% anatasa. Encontraron que los materiales desarrollados son capaces de eliminar el 35% de NO<sub>x</sub>, utilizando lámparas de luz UV (2 tubos de 8 W).

---

De igual manera, Cárdenas et al. [57] prepararon pastas de cemento para descontaminación de NO<sub>x</sub>, utilizando TiO<sub>2</sub> comercial (100% anatasa, 100% rutilo y Aeroxide P-25). Las muestras se prepararon con diferentes adiciones de TiO<sub>2</sub>, en peso de cemento (0.5, 1, 3 y 5%). De acuerdo con los resultados obtenidos, lograron la reducción de NO<sub>x</sub> en un 17%, utilizando una lámpara de luz UV de 300 W, después de 65 horas de reacción.

Por otra parte, Senff et al., [58] elaboraron morteros para probar la descontaminación de NO<sub>x</sub>, mezclados con TiO<sub>2</sub> (Anatasa 80% y Rutilo 20%, Aeroxide P25). Se encontró que después de una hora de reacción se logró degradar entre un 65 y un 80%, bajo irradiación de luz solar.

En este sentido, cabe hacer notar la importancia de la fotocatalisis para llevar a cabo la eliminación de sustancias tóxicas y dañinas para el medio ambiente.

---

### 1.4.3. Reducción de CO<sub>2</sub>

Como se ha venido mencionando en las últimas décadas, el empleo de la fotocatálisis heterogénea está teniendo un rol importante para contribuir a la limpieza del medio ambiente; particularmente se está utilizando para llevar a cabo el control de la contaminación ambiental, mediante la purificación del aire, el agua, superficies auto-limpiantes y más recientemente la reducción del CO<sub>2</sub>. Esta última es de gran importancia; ya que, además de contribuir a su disminución en el ambiente, también se aprovecha para la obtención de metano, metanol y ácido fórmico, como fuentes de energía [59-61].

La reducción de CO<sub>2</sub> se puede llevar a cabo mediante diversos métodos, tales como los de reducción electroquímica, biológica, térmica y fotocatalítica. Sin embargo, en muchos de los casos se tienen desventajas considerables que no permiten su aplicación en el nivel industrial. Recientemente, se ha puesto particular empeño en la reducción de CO<sub>2</sub> por medio de la fotocatálisis, ya que se está buscando impulsar esta tecnología para aprovechar la luz solar, que es una fuente de energía más abundante, barata, limpia y segura. En este caso, la reducción de CO<sub>2</sub> se lleva a cabo mediante la activación de un semiconductor por efecto de la luz, generando el par hueco-electrón que se transfiere de manera efectiva a la superficie para que pueda reaccionar con el CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, para generar los subproductos anteriormente mencionados [62]. Sin embargo, es muy importante que el fotocatalizador tenga sus electrones con mayor energía, en comparación con el potencial de reducción de CO<sub>2</sub> [63].

Entre las posibles reacciones de foto-reducción de  $\text{CO}_2$  que pueden ocurrir en medio acuoso se encuentran las mostradas en la tabla 4. Como se puede observar, el monóxido de carbono (CO) es el producto más común que puede formarse, ya que sólo se necesitan dos protones ( $2\text{H}^+$ ) y dos electrones ( $2\text{e}^-$ ). Así mismo, el ácido fórmico también es un producto común y se encuentra en la reducción de  $\text{CO}_2$ , ya que requiere la misma cantidad de protones y electrones, sólo que requiere un potencial de reducción más alto [64]; sin embargo, también se pueden obtener subproductos útiles, tales como formaldehído, metano, metano y etanol [65].

**Tabla 3.** Posibles productos obtenidos de las reacciones de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ .

Subproductos reducción fotocatalítica	Reacciones obtenidos	$E^0_{\text{redox}}$
Ácido fórmico	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	-0.61
Metanol	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	-0.38
Metano	$\text{CO}_2 + 8\text{H}^+ + 8\text{e}^-$	-0.24
Etanol	$2\text{CO}_2 + 12\text{H}^+ + 12\text{e}^-$	-0.16

Por otro lado, dentro de los materiales semiconductores que han sido estudiados en la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ , el dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es el que mayor atención ha recibido para la foto-reducción de  $\text{CO}_2$  a otros compuestos en fase acuosa o fase gas, tal y como se observa en la tabla 5.



---

**Tabla 4.** Estudios previos de reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>.

Referencia	Catalizador	Tipo de lámpara	Tiempo de exposición	Subproducto obtenido
[66]	6H-SiC	Laser de 355 nm y lámpara XeHg (500 W)	1.5 horas	Metanol
[67]	TiO <sub>2</sub> FeTiO <sub>3</sub> / TiO <sub>2</sub>	lámpara Xenón (500 W), filtro para acortar luz UV	3 horas	Metanol
[68]	TiO <sub>2</sub> dopado con Fe	Lámpara halógeno (300 W)	6 horas	Metanol

La razón por la cual los compuestos basados en óxido de titanio son los más utilizados para este tipo de reacciones obedece a sus características fisicoquímicas, como son: disponibilidad, eficiencia y estabilidad química [69] cuando se exponen a compuestos ácidos y básicos, además de que es química y biológicamente inerte, sensible a la luz y relativamente barato, en comparación con otros fotocatalizadores [35][70,71].

---

### **1.5. Áreas de oportunidad en la tecnología de fotocátalisis empleando materiales cementantes.**

De acuerdo con los antecedentes presentados, existen aún varias áreas de oportunidad para el estudio de materiales cementantes con fotocatalizador para la degradación de contaminantes presentes en medio acuoso y en fase gas. Lo anterior debido a que aún hay muchas variables que pueden modificarse para lograr una mayor eficiencia en los procesos fotocatalíticos a gran escala, tales como la concentración de contaminantes, la humedad relativa, la intensidad de la luz, la cristalinidad y el tamaño de partícula de los semiconductores empleados, entre otros [72]. Hasta el momento, los resultados son prometedores ya que se ha logrado incorporar el  $\text{TiO}_2$  en los concretos, los morteros, los azulejos, los pavimentos, las pinturas y los vidrios [73,74], tanto en el nivel laboratorio como en algunas construcciones [8].

Sin embargo, la eficiencia fotocatalítica de este óxido es todavía limitada, debido a la recombinación de cargas generadas a consecuencia del ancho de banda prohibida de 3.2 eV que presenta [75-77]. Por lo tanto, la modificación del  $\text{TiO}_2$  para mejorar su actividad fotocatalítica y su extensión de foto-respuesta a la región de luz visible es una de las tareas primordiales en el área de la fotocátalisis. Esto ha conducido al desarrollo de investigaciones relacionadas en el dopaje del  $\text{TiO}_2$  con otros metales, a la preparación de mezclas de  $\text{TiO}_2$  con otros óxidos para formar heterouniones, así como el llevar a cabo el depósito de este óxido sobre diversos sustratos químicamente resistentes.

---

Dentro de los soportes que recientemente han sido empleados para soportar el  $\text{TiO}_2$ , se puede mencionar el SiC, debido a sus excelentes propiedades tales como: la alta termo-estabilidad, la conductividad térmica, la resistencia mecánica y la baja reactividad química [78]. Este material (SiC), por si solo, presenta una baja actividad fotocatalítica, por lo que rara vez se utiliza en este tipo de reacciones. No obstante, se ha encontrado que al estar combinado con el  $\text{TiO}_2$  ( $\text{SiC-TiO}_2$ ), la actividad se incrementa debido a un efecto de sinergia que ocurre entre ambos semiconductores [79]. Esto ha permitido que en los últimos años se estén realizando investigaciones enfocadas a la evaluación del  $\text{SiC-TiO}_2$  en reacciones de degradación fotocatalítica de colorantes orgánicos en fase acuosa, tales como el índigo carmín, el azul de metileno [80] y la rodamina B [81], así como en la oxidación fotocatalítica de metiletilcetona en fase gaseosa [82,83] y en la producción de hidrógeno [84]. Incluso se ha mezclado con morteros y pastas para su evaluación como material cementante y autolimpiante, presentando resultados importantes [49].

De esta manera, con base en los buenos resultados obtenidos al utilizar el  $\text{SiC-TiO}_2$  como fotocatalizador en forma de polvos, es de nuestro interés llevar a cabo su aplicación como recubrimiento en morteros de cemento, para su evaluación fotocatalítica en experimentos de auto-limpieza y reducción de  $\text{CO}_2$ , buscando de esta manera mantener la versatilidad y la sinergia entre ambos semiconductores para incrementar la actividad fotocatalítica al contar con una mayor área de exposición a la luz. Además, se compararan los tres diferentes tipos de irradiación, luz solar simulada, luz solar natural y luz UV,

---

para determinar el efecto de cada una de ellas sobre los materiales cementantes preparados.

---

## 1.6. Justificación

Los materiales cementantes con la adición de un fotocatalizador permiten que las fachadas de las construcciones conserven su aspecto estético durante mayores periodos de tiempo que los realizados con materiales cementantes convencionales. Esto se debe a que, bajo la acción de la luz solar se provoca la descomposición de algunas sustancias orgánicas e inorgánicas, evitando su acumulación y convirtiéndolas en sustancias menos nocivas para el medio ambiente y la salud humana.

Dentro de los materiales mayormente empleados en este tipo de reacciones fotocatalíticas, se encuentra el  $\text{TiO}_2$ , que es barato, resistente químicamente y muy activo bajo luz UV. Sin embargo, en la mayoría de los reportes encontrados este óxido ha sido añadido en el proceso de mezclado, lo que provoca que su actividad se vea disminuida con el paso del tiempo. Para evitar lo anterior es necesario que el fotocatalizador pueda tener mayor área de exposición, como sería el estar depositado en forma de recubrimiento para de esta forma aprovechar de manera más adecuada la luz irradiada. En este sentido, existen muy pocos trabajos que utilicen el  $\text{TiO}_2$  en forma de recubrimiento sobre los materiales cementantes y, menos aún donde se utilicen recubrimientos de mezclas de fotocatalizadores. Por tal motivo, realizar investigaciones que contribuyan a generar nuevos conocimientos sobre el comportamiento de los materiales cementantes recubiertos con fotocatalizadores es de gran importancia, ya que permitirían proponer alternativas de materiales para diversos tipos de edificaciones y/o

---

construcciones. En este trabajo, es de nuestro interés el recubrir morteros con SiC-TiO<sub>2</sub>, que ha demostrado ser un excelente fotocatalizador por sí solo, para degradar compuestos orgánicos bajo luz UV; por lo que, al ser empleado sobre morteros, su actividad fotocatalítica puede ser explotada de forma práctica para inducir reacciones de auto-limpieza ambiental, como son la degradación del colorante Rodamina B y la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>, por efecto de la luz irradiada. Esta última reacción es trascendental; ya que, además de contribuir a la disminución de este gas contaminante en el ambiente, también se empleará esta reacción para la obtención de metano, metanol y ácido fórmico, como subproductos de valor agregado.

---

### **1.7. Objetivo general**

Determinar la actividad fotocatalítica de materiales cementantes recubiertos con una pasta de SiC-TiO<sub>2</sub>, para aprovechar la mayor superficie expuesta, con el fin de obtener materiales auto-limpiantes capaces de eliminar Rodamina B en un medio acuoso bajo irradiación de luz UV, luz solar natural y/o simulada y además llevar a cabo la reducción de CO<sub>2</sub> en fase acosa y fase gas.

---

### 1.8. Objetivo particulares

- Elaborar los especímenes de morteros de acuerdo con la Norma ASTM C109/C109M-08, para que logren las propiedades mecánicas establecidas en la misma.
- Evaluar las propiedades mecánicas de los especímenes para comprobar su resistencia a la compresión, a la edad de 28 días.
- Obtener morteros fotocatalíticos mediante la aplicación de recubrimientos con base en pastas de SiC-TiO<sub>2</sub>, con el propósito de tener una mayor área de exposición a la luz irradiada.
- Comprobar la presencia del fotocatalizador en los morteros recubiertos, mediante la técnica de DRX, para identificación de fases, por MEB, para conocer su morfología, por Espectroscopia de UV-Vis, para la determinación del  $E_g$  y BET para determinar su área superficial.
- Determinar la posición de las bandas de conducción y valencia a partir de las pruebas de impedancia electroquímica en modo potencioestático.
- Evaluar las pruebas fotocatalíticas para la degradación del colorante Rodamina B en fase acuosa y determinar la eficiencia fotocatalítica bajo luz UV, luz Solar Natural y luz Solar simulada.



- 
- Evaluar las pruebas fotocatalíticas de reducción de  $\text{CO}_2$  para la obtención de metano y/o metanol y determinar la eficiencia fotocatalítica bajo luz UV.

---

## 1.9. Hipótesis

Al recubrir los morteros gris y blanco con un fotocatalizador como es el SiC-TiO<sub>2</sub> y/o TiO<sub>2</sub>, éstos mejorarán sus propiedades fotocatalíticas, por lo que al ser irradiados con luz UV, luz solar natural y/o simulada, presentarán una alta actividad en las reacciones de degradación de la Rodamina B y la reducción del CO<sub>2</sub>, contribuyendo con ello a la obtención de materiales cementantes auto-limpiantes que permitan la eliminación de contaminantes dañinos al medio ambiente y generando, además, sub-productos de alto valor agregado.

---

## CAPITULO 2. EXPERIMENTAL

En el presente capítulo se describe el método de síntesis empleado en la obtención del fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub>, el depósito de recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub> sobre muestras de mortero, las técnicas de caracterización físico-químicas utilizadas para el estudio de los materiales y el método implementado para la degradación fotocatalítica del colorante Rodamina B y la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>. En el primer caso, se estudiaron los parámetros de la reacción fotocatalítica empleando dos diferentes tipos de mortero (gris y blanco), así como tres diferentes tipos de irradiación: luz simulada, luz solar y luz UV. Para el segundo caso, se estudiaron parámetros tales como el pH, la presión, la temperatura y la reproducibilidad.

Primeramente se llevó a cabo la síntesis del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>, que fue sintetizado por microemulsión. Posteriormente se llevó a cabo la preparación de los morteros con recubrimientos de pastas de SiC-TiO<sub>2</sub>. El depósito de los recubrimientos se realizó empleando la técnica Doctor Blade (screen printing) que consiste en aplicar el recubrimiento en forma de pasta con la ayuda de un rodillo o paleta.

---

Por otra parte, el fotocatalizador y los morteros recubiertos fueron caracterizados, para conocer sus propiedades físico-químicas. Para la caracterización estructural de los recubrimientos se utilizó Difracción de rayos X (DRX). La morfología superficial se estudió mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y para la caracterización óptica, espectroscopia de UV-Vis. Finalmente, se realizó la evaluación fotocatalítica para la degradación del colorante Rodamina B y la reducción de CO<sub>2</sub>, ambas en fase acuosa.

## **2.2. Síntesis del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> por el método de microemulsión.**

El compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> se preparó empleando una relación del 20% de dióxido de titanio y el 80% de carburo de silicio, mediante la síntesis de microemulsión de aceite en agua. Esta reacción implica el uso de un precursor organometálico disuelto en una fase oleosa, que es estabilizado mediante un surfactante y posteriormente disuelto en una fase acuosa. Una de las ventajas de este método de síntesis es que permite obtener materiales reproducibles en condiciones suaves mejorando las propiedades físico-químicas tales como la cristalinidad y el área superficial [85].

Para la preparación del compuesto, primeramente se llevó a cabo la síntesis de microemulsión para la obtención del TiO<sub>2</sub> y, posteriormente, se adicionó el SiC para obtener el compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>. La preparación del TiO<sub>2</sub> se llevó a cabo usando un precursor organometálico disuelto en aceite y estabilizado por un tensoactivo, que posteriormente es disperso en una fase

---

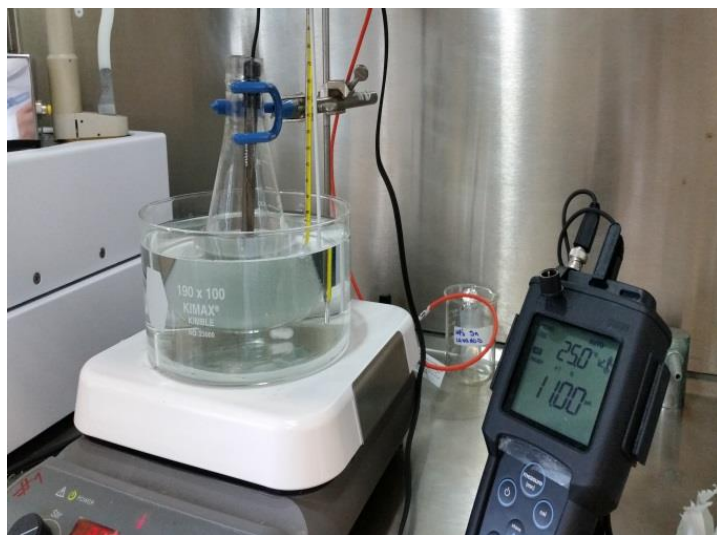
oleosa. En este caso las relaciones empleadas fueron de un 40% de fase oleosa, un 40% de tensoactivo y un 60% de fase acuosa.

Primeramente, la fase oleosa se formó añadiendo 8 gr del precursor de  $\text{TiO}_2$  (Titanio VI 2-etilhexonato, 97%) en un matraz de 250 ml, que fueron dispersados en 40 gr del aceite isoctano Trimetilpentano y posteriormente estabilizados por el surfactante tensoactivo Synperonic 91/5 marca De Croda. Una vez conformada la fase oleosa, se adicionaron 120 gr de agua desionizada para la formación como fase acuosa. Todos los componentes se mezclaron por agitación Vortex, a una temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ , hasta que la microemulsión formada se estabilizó y se volvió transparente. Enseguida se añadieron 4 gr de carburo de silicio (Sigma Aldrich) y se ajustó el pH de la reacción empleando hidróxido de amonio, hasta a alcanzar un pH de 11, como se muestra en la figura 3. Después la mezcla de la reacción se dejó en agitación durante un periodo de 24 horas, ya que la agitación facilita la formación de la microemulsión al disminuir progresivamente el tamaño de las gotas, para dar lugar a gotas más pequeñas.

Una vez transcurrido este tiempo, la solución obtenida se centrifugó para separar el precipitado de la disolución líquida. Posteriormente, el precipitado resultante se lavó varias veces con agua desionizada, hasta alcanzar un pH de 7 y, finalmente, se procedió a lavarse dos veces más con alcohol isopropílico, para eliminar los componentes orgánicos y las posibles impurezas.

---

Una vez obtenido el precipitado, se secó éste en una estufa a 70°C, durante un periodo de 48 horas. Finalmente, la muestra sintetizada se calcinó en la mufla a 450°C, para que los precursores cristalizaran en la fase SiC-TiO<sub>2</sub>.



**Figura 3.** Ajuste del pH en la reacción de microemulsión

---

## 2.2. Preparación de especímenes de mortero.

Para este trabajo se propuso la fabricación de especímenes de mortero empleando una relación entre el agua y el material cementante, de 0.485. Las muestras de los morteros se prepararon de acuerdo con la norma ASTM C-109-2007 [86], utilizando cemento Portland ordinario gris CPO 40R y cemento blanco CPC 30B. En la figura 4 se muestran las materias primas empleadas.



**Figura 4.** Materia prima para la preparación de especímenes de mortero.

Por otro lado, se estableció emplear una relación de una parte de cemento con 2.75 partes de arena sílica estándar. Las cantidades de materiales utilizadas en el proceso de mezclado para la fabricación de 6 especímenes de mortero se presentan en la tabla 6.

**Tabla 5.** Dosificación de los materiales para la elaboración de los morteros.

Material	Preparación de 6 especímenes
Cemento, g	500
Arena, g	1375
Agua, mL	242

---

Para la preparación de los morteros se empleó una mezcladora Hobart de modelo N50, de 3 velocidades, como la que se muestra en la figura 5. Primeramente se colocaron 242 ml de agua, enseguida se adicionaron 500 gr de cemento y se mezcló a velocidad baja ( $140\pm5$  r/min) durante 30 segundos. Enseguida se añadió lentamente la arena sílica y se continuó el mezclado a velocidad baja durante 30 segundos. Posteriormente se detuvo la mezcladora y se cambió la velocidad a una velocidad media ( $285\pm10$  r/min), se continuó el mezclado durante 30 segundos más y a continuación se apagó la mezcladora. Se rasparon las paredes del tazón para retirar el mortero pegado a las orillas, esto en un tiempo de 15 segundos. Posteriormente se cubrió el tazón con una franela húmeda, durante 90 segundos, para evitar la pérdida de humedad. Finalmente se retomó el proceso de mezclado durante 60 segundos, a una velocidad media ( $285\pm10$  r/min).

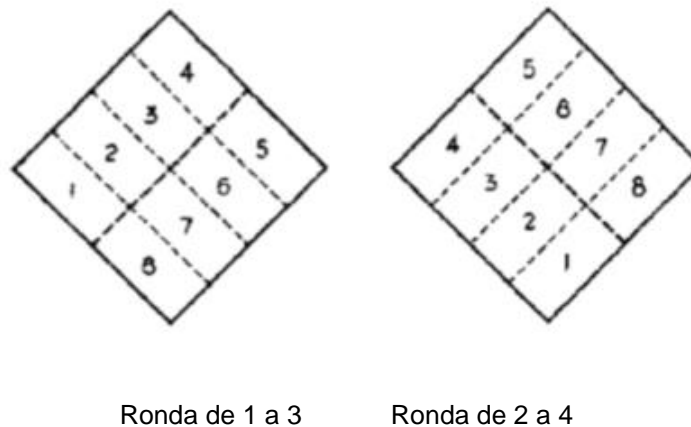


**Figura 5.** Preparación de la mezcla de morteros, con una relación agua/cemento de 0.485.



---

Una vez que se completó el tiempo de mezclado, se procedió a realizar el llenado de los moldes. Primeramente se colocó una capa de mortero a la mitad del molde y se apisonó el mortero en cada compartimiento del molde 32 veces, durante 10 segundos, en 4 rondas, en ángulos rectos, tal como se muestra en la figura 6. Una vez completa la primera capa en todos los compartimientos del molde, se realizó el mismo procedimiento para el llenado del molde. Finalmente, se enrazó el mortero excedente y se le dio el acabado con una llana metálica.



**Figura 6.** Orden de apisonado en el moldeo de los especímenes de ensayo. Modificada de la Norma ASTM C109/C109M

Los especímenes se dejaron fraguar durante un periodo de 24 horas; posteriormente, se procedió a desmoldar los morteros y éstos se conservaron en un cuarto de curado con una temperatura controlada de 25°C, donde fueron sumergidos en agua con cal durante un periodo de 28 días. Una vez

---

transcurrido el tiempo de curado, se procedió a realizar el ensayo de los morteros, para determinar su resistencia a la compresión, seleccionándose 3 especímenes por cada mezclado, como se muestra en la figura 7.



**Figura 7.** Especímenes de mortero después del curado.

### **2.3. Preparación de las muestras de mortero.**

Los sustratos se prepararon a partir de un cubo de mortero. Una vez cumplido el tiempo de curado, se realizaron cortes transversales utilizando una cortadora de precisión Isomet 1000, para obtener piezas de 5.0 cm de largo por 2.5 cm de ancho y  $0.6 \pm 0.2$  cm de espesor. Una vez cortadas las muestras, fueron estas desbastadas y pulidas para obtener una superficie homogénea, empleando lijas de tamaño de grano de 80. Después del proceso de desbaste, las muestras se lavaron con agua destilada, hasta alcanzar el punto de ebullición durante 4 horas. Posteriormente, las piezas obtenidas se lavaron durante 5 minutos, en un baño de ultrasonido, con agua destilada, permitiendo

---

eliminar cualquier contaminación en los sustratos. Una vez limpio el sustrato, se secó éste en una estufa, a una temperatura de 80°C, durante 3 horas.

#### **2.4. Preparación de la pasta empleada para los recubrimientos fotocatalíticos.**

Los recubrimientos fotocatalíticos SiC-TiO<sub>2</sub>, se llevaron a cabo mediante la extensión de una pasta sobre los sustratos de mortero. Primeramente se procedió a la preparación de las pastas de SiC-TiO<sub>2</sub>, utilizando los siguientes componentes químicos: ácido acético, etanol, terpinol, etilcelulosa y el fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub>.

Se pesaron 2 gramos de polvo del fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub>, se colocaron en un mortero de ágata y se añadieron 0.33 ml de ácido acético por molienda manual, durante 5 minutos. Al término de ese tiempo se añadieron 0.33 ml de agua y se continuó el proceso de molienda durante 1 minuto más, repitiendo este proceso 5 veces. Posteriormente se agregaron 0.33 ml de etanol y se continuó la molienda durante 1 minuto más. De igual modo, este paso se repitió 15 veces. Finalmente, se añadieron 0.83 ml de etanol y se continuó la molienda durante 1 minuto, repitiendo este proceso 6 veces.

Después del proceso de molienda, la mezcla se transfirió a un vaso de precipitado, con 33.3 ml de etanol y se dejó en agitación en un baño de ultrasonido durante 30 minutos. Al cabo de este tiempo se adicionaron 6.6 gr de terpineol y se continuó la agitación en ultrasonido durante 20 minutos más.

---

Posteriormente, se adicionó 1 gr de etilcelulosa, que fue previamente disuelto en 10 mililitros de etanol, y se dejó en agitación durante 20 minutos.

La mezcla obtenida se colocó en una plancha a una temperatura de 100°C durante un tiempo aproximado de 5 horas. Esto con el fin de lograr la evaporación de los solventes empleados en la elaboración de la pasta. Después del proceso de evaporación, la mezcla fue transferida a un mortero de ágata y se realizó una vez más un proceso de molienda para obtener la consistencia deseada. Por último, la pasta preparada se colocó en recipientes cerrados para su posterior aplicación.

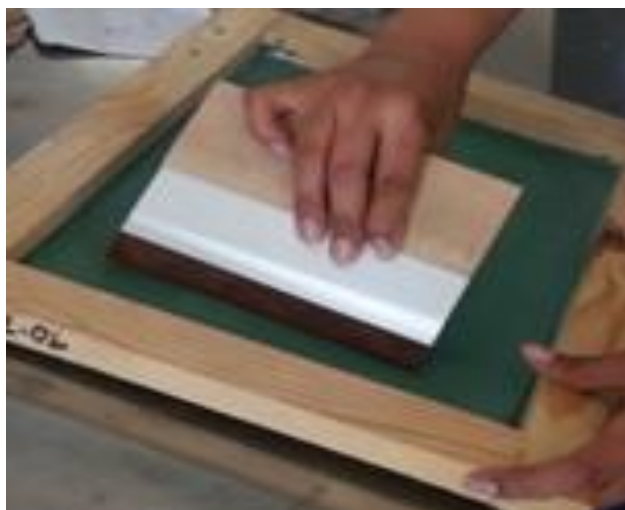
## **2.5. Depósito de recubrimientos sobre los morteros.**

Existen varias técnicas para la preparación de recubrimientos, siendo la técnica de Doctor Blade o “screen printing” una de las rutas más simples y convenientes para la preparación de películas. La técnica consiste en la extensión de una pasta sobre un sustrato, para el depósito del material, el que posteriormente se eleva a la temperatura deseada (400°C), para producir una película de espesor dado.

Para este trabajo se emplearon muestras de mortero que se utilizaron como sustratos de soporte, los que se cortaron en piezas de dimensiones de 5x2.5 y de 0.5±0.2 cm de espesor. Dichos sustratos se ligaron para obtener superficies uniformes los que posteriormente se lavaron y secaron a 100°C, durante 2 horas.

---

La pasta preparada se depositó directamente sobre los sustratos de mortero, mediante la técnica Doctor Blade (screen printing). Esta técnica consistió en depositar la pasta de  $\text{SiC-TiO}_2$  sobre los morteros, utilizando una malla de nylon [87]. La pasta se presiona a través de la pantalla empleando la lámina de goma, tal como se muestra en la figura 8. Después de realizar los recubrimientos, los morteros recubiertos fueron sinterizados a  $400^\circ\text{C}$ , durante 2 horas, para la eliminación de los componentes orgánicos en la pasta.



**Figura 8.** Depósito de películas por la técnica Doctor Blade.

Las muestras se dejaron enfriar en un desecador hasta la temperatura ambiente y se secaron para obtener, por medio del método gravimétrico, los gramos depositados del fotocatalizador  $\text{SiC-TiO}_2$ . Finalmente, las muestras se guardaron en un lugar seco y limpio, para su posterior evaluación. Ver la figura 9.



**Figura 9.** Depósito de películas por la técnica Doctor Blade.

## **2.6. Caracterización.**

Los materiales sintetizados, así como los morteros recubiertos, se caracterizaron con la finalidad de conocer sus principales propiedades fisicoquímicas y estructurales. A continuación se describen brevemente las técnicas empleadas, así como las condiciones de análisis bajo las que se llevaron a cabo esas medidas.

### **2.6.1. Difracción de rayos X.**

La técnica de Difracción de Rayos X permite la identificación y caracterización cualitativa y cuantitativa de las fases cristalinas de una muestra sólida. Las estructuras cristalinas poseen planos producidos por el ordenamiento repetitivo de los átomos que son capaces de difractar rayos X. El fundamento de esta técnica se debe a la ley de Bragg, que explica de manera sencilla que cuando un haz de rayos X incide en un ángulo  $\Theta$  en una estructura

---

ordenada, la ley establece que para que las ondas reflejadas estén en concordancia de fase y, por lo tanto, den lugar a una difracción, es necesario que la diferencia de camino recorrido de las dos reflexiones sea múltiplo de la longitud de onda del haz incidente. Estas observaciones se traducen matemáticamente por medio de la siguiente ecuación:

$$2d \sin \Theta = n\lambda \quad \text{ecuación 1}$$

Dónde:  $d$  es la distancia interplanar;  $n$  es el número entero que representa el orden de la difracción y  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente de rayos X.

En el caso del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> y de los morteros, esta técnica se empleó para verificar la cristalinidad de los materiales, determinar la proporción de cada fase y evaluarla mediante la comparación de las intensidades de sus reflexiones principales, con las obtenidas en muestras de referencia. El análisis de los materiales se llevó a cabo en un difractómetro de rayos X D8 Advance, utilizando radiación CuK $\alpha$ ,  $\lambda=1.5418 \text{ \AA}$ , en un intervalo de 20 y a 70° en  $2\Theta$ .

Para realizar el análisis del fotocatalizador en polvo fue necesario tratarlo térmicamente, a una temperatura de 450°C. La preparación de la muestra se realizó colocando el polvo en un porta muestra plano de vidrio. En el caso de los morteros recubiertos, estos se cortaron en piezas de 2x2 cm y 0.5±0.1 cm de espesor las que se colocaron en las mismas condiciones que los polvos para su análisis.

---

### 2.6.2. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

La microscopía electrónica de barrido es una técnica que permite la caracterización superficial de los materiales, como son las propiedades morfológicas del material analizado, creando una imagen amplificada de la superficie de las muestras. Esta técnica se basa en recorrer la muestra con un haz concentrado de electrones. A la medida que el haz barre la muestra, se presenta una imagen magnificada de la morfología externa de la muestra.

Con la finalidad de determinar la morfología y el tamaño de las partículas de la muestra, se empleó el análisis microestructural MEB, empleando un equipo JOEL modelo JSM6490LV, con un filamento de tungsteno equipado con una sonda de microanálisis de dispersión de energía de Rayos X (EDS), que permite obtener la composición química de los materiales.

El compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> fue analizado en forma de polvo. Se colocó en un portamuestras de aluminio sobre una cinta de carbón. En el caso de las muestras de mortero, estas fueron colocadas en piezas de aproximadamente 2x2 cm y 0.5±1 cm y se recubrieron con una capa fina de oro-paladio, para su posterior análisis.



---

### **2.6.3. Espectros de reflectancia difusa para la determinación del $E_g$ .**

La espectroscopia UV-Visible por reflectancia difusa estudia la luz que se refleja en la superficie de los objetos. La reflectancia difusa consiste en la medida de la luz que ha sido difundida por la superficie del material en todas las direcciones. La espectroscopia UV-Visible es ideal para la caracterización de las propiedades ópticas y electrónicas de diversos materiales tales como películas, filtros y polvos.

El papel de la esfera integradora es recoger y enfocar al detector toda la luz que provenga de la muestra, cualquiera que sea su dirección. Al utilizar este accesorio se puede determinar la energía de banda prohibida denominada  $E_g$ . Esta propiedad que presentan los semiconductores está relacionada con la energía necesaria con la que se deben irradiar los materiales para su activación

Los espectros de reflectancia difusa se obtuvieron utilizando un espectrofotómetro modelo UV-Vis-Nir Cary 5000, equipado con una esfera de integración para el análisis de sólidos. Para el análisis de las muestras en polvo se utilizó un portamuestras, en el que se colocaron aproximadamente 0.5 gramos y en el caso de las muestras de mortero se emplearon placas de 5.0x2.5x0.5 cm; estas se colocaron directamente en el portamuestras. Las condiciones de operación para el análisis en función de reflectancia tuvieron una longitud de onda de 200 a 800 nm.

---

La energía de banda prohibida se calculó empleando los espectros de absorción de UV-Vis, con la ecuación de la energía [88]:

$$E_g \text{ (eV)} = hc/\lambda = 1240/\lambda \quad \text{ecuación 2}$$

dónde:

$E_g$  es la energía de banda prohibida (eV),  $h$  es la constante de Planck,  $c$  es la velocidad de la luz (m/s) y  $\lambda$  es la longitud de onda expresada en nm.

#### **2.6.4. Área superficial (BET).**

Para el análisis e interpretación de las propiedades texturales de los materiales, se tomaron en cuenta los resultados de las isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno. Esta técnica es complementaria y a partir de sus resultados es posible determinar el área superficial. La técnica de caracterización BET es ampliamente utilizada para determinar el área superficial específica de un material. Este parámetro expresa la relación de la superficie total del catalizador y el peso del mismo ( $\text{m}^2/\text{gr}$ ). Esta técnica usa el principio de la adsorción de un gas inerte (nitrógeno), para variar la relación entre la presión parcial de nitrógeno y la presión de la temperatura del nitrógeno líquido.

El análisis BET de la materia prima y los morteros se realizó en un equipo de fisisorción Bel JAPAN, Modelo Belsorp Mini, utilizando nitrógeno líquido como absorbato a una temperatura de 77° K. Previamente, las muestras

---

se desgasificaron durante 1, hora a 300°C, en un vacío de  $10^{-4}$  bar, para asegurar que la superficie estuviera limpia, seca y libre de especies adsorbidas. Los datos y las condiciones de la muestra se controlaron mediante un ordenador, utilizando un software específico.

#### **2.6.5. Determinación de las estructuras de bandas, mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS)**

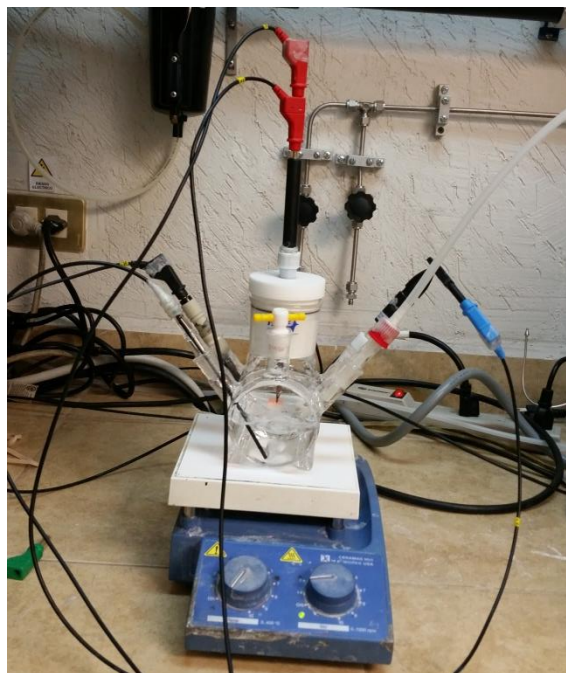
La espectroscopía de impedancia es una técnica para estudiar sistemas y procesos electroquímicos. En comparación con otras técnicas, presenta la ventaja de que no es destructiva y que permite caracterizar el comportamiento electroquímico de una interfase electrodo-electrolito [89].

En este trabajo, la posición de la banda de valencia y conducción de cada uno de los materiales semiconductores SiC y TiO<sub>2</sub>, empleados como recubrimiento en los morteros gris y blanco, se determinó usando la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica en modo potenciostático. El intervalo de potencial empleado en el caso de SiC fue de -1.28 a -1.5 V vs. Ag/AgCl y para el caso de TiO<sub>2</sub> entre -1.0 a 0 V vs. Ag/AgCl.

Se utilizó una celda electroquímica con tres electrodos, un electrodo de platino (Pt) y un electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) como contra-electrodo y electrodo de referencia, respectivamente. El electrodo de trabajo consistió en el depósito de una película en una cinta conductora de Cu de 1x1, cm tal y como se muestra en la figura 10. Dichos electrodos estaban

---

sumergidos en una solución electrolítica de sulfato de sodio  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0.1 M (pH= 6.5) conectados entre sí por un circuito eléctrico el cual se encontraba conectado al potencióstato-galvanostato PGSTAT 302N AUTOLAB.

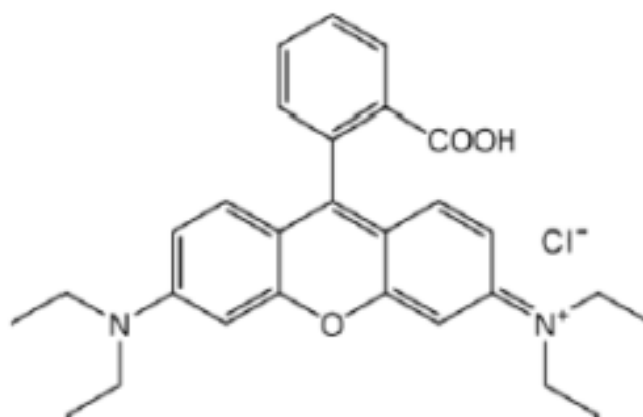


**Figura 10.** Celda electroquímica de tres electrodos.

---

## 2.7. Degradación del colorante Rodamina B.

Para llevar a cabo la evaluación fotocatalítica, se empleó como modelo de contaminante al colorante Rodamina B, porque es altamente soluble en agua, tiene baja sensibilidad a la alcalinidad de los materiales cementicios y su estructura química consiste en un hidrocarburo aromático policíclico muy similar a la estructura de algunos contaminantes presentes en los ambientes urbanos, ver figura 11 [46].



**Figura 11.** Molécula orgánica de rodamina B

### 2.7.1. Prueba de fotólisis.

El proceso de fotólisis se llevó a cabo para evaluar el efecto que tendrá la energía irradiada sobre las moléculas orgánicas del colorante que se empleará en las pruebas de degradación fotocatalítica.

---

En este caso se evaluaron las pruebas de fotólisis para el colorante Rodamina B, empleando tres tipos de irradiación: luz simulada utilizando un simulador solar, luz visible usando radiación solar natural y luz ultravioleta, con una longitud de onda de 254 nm. Para el desarrollo experimental se colocaron 70 ml de solución del colorante rodamina B, a 5 ppm en una caja Petri que se colocó en la oscuridad, para evitar la interferencia de la luz externa. Posteriormente, la muestra fue irradiada con los tipos de irradiación mencionados.

La cinética de degradación se monitorizó tomando alícuotas cada 2 horas, durante 8 horas, bajo irradiación. Las muestras se analizaron mediante espectrofotometría UV-Vis siguiendo la banda de absorción máxima de 554 nm para el caso del colorante Rodamina B.

### **2.7.2. Pruebas de adsorción.**

El fenómeno de adsorción juega un papel importante en el proceso de fotocátalisis, ya que las moléculas que se adhieren a la superficie son más susceptibles a oxidarse. Debido a que las muestras de mortero son porosas, se llevó a cabo una prueba de adsorción del colorante Rodamina B, la que consistió en colocar una muestra de mortero recubierto con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> en una caja Petri que contenía 70 ml de solución del colorante rodamina B, a una concentración de 5 ppm. Las muestras se mantuvieron en oscuridad y la cinética de degradación se monitorizó tomando alícuotas cada 30 minutos,

---

durante 2 horas. Posteriormente, las muestras se analizaron mediante espectrofotometría UV-Vis, siguiendo la banda de absorción máxima de 554 nm, para el caso de la Rodamina B.

### **2.7.3. Pruebas de degradación fotocatalítica bajo luz solar simulada.**

La actividad fotocatalítica de las muestras de mortero recubiertas con SiC-TiO<sub>2</sub> se evaluó mediante la degradación de la Rodamina B, la que se empleó como colorante modelo. Los experimentos se llevaron a cabo con una concentración inicial de 5 ppm, a la temperatura ambiente.

Para evaluar la eficiencia de las propiedades de autolimpieza de los materiales se emplearon tres tipos de radiaciones: luz simulada, exposición directa al sol y luz ultravioleta.

Los experimentos de degradación con luz simulada se realizaron en un simulador solar Oriel Instruments modelo 69920 equipado con una lámpara de Xenón que trabaja desde 360 a 495 W, que produce un espectro uniforme que simula la luz solar real, según se muestra en la figura 12. Este equipo de simulador solar tiene la ventaja de que se puede trabajar de forma reproducible sin que se vean afectadas las mediciones por las condiciones climatológicas y en condiciones similares a la radiación solar.



**Figura 12.** Simulador solar empleado en pruebas fotocatalíticas con luz simulada.

Para cada uno de los experimentos se colocó una muestra de mortero recubierta con  $\text{SiC-TiO}_2$  en una celda de cuarzo. Se colocaron 70 ml de solución acuosa del colorante Rodamina B con una concentración de 5 ppm. El sistema se dejó en obscuridad durante 30 minutos hasta alcanzar el equilibrio adsorción-desorción. Posteriormente, se expuso a la radiación simulada proporcionada por un simulador solar, colocándose a una distancia aproximada de 30 centímetros, de manera que incida la radiación de forma perpendicular. El seguimiento se llevó a cabo durante 8 horas, tomando alícuotas de la solución con intervalos de 2 horas. Transcurrido este tiempo, las muestras fueron centrifugadas y posteriormente analizadas en un espectrómetro Ultravioleta-Visible Perkin Elmer Lambda 35, empleando una celda de cuarzo para el análisis de líquidos. La actividad fotocatalítica de las muestras se estimó por el porcentaje de degradación:



---

$$\% \text{ Degradación} = [(C_0 - C) / C_0] \times 100 \quad \text{ecuación 3}$$

Dónde:  $C_0$  es la concentración inicial de la Rodamina B,  $C$  es la concentración final después de un tiempo definido de irradiación.

#### **2.7.4. Pruebas de degradación fotocatalítica en el sol.**

El diseño del experimento fue muy similar al descrito en la foto degradación con luz simulada empleando un simulador solar. En este caso, se colocó una muestra de mortero recubierta con SiC-TiO<sub>2</sub> dentro de un frasco con tapa que contenía 70 ml de solución del colorante rodamina B, con una concentración de 5 ppm. La muestra se dejó en oscuridad durante 30 minutos para su adsorción. Transcurrido este tiempo, los frascos se colocaron en la intemperie, para recibir la radiación solar en forma directa. La solución se mantuvo durante 8 horas a exposición directa de los rayos solares, se monitoreo la reacción tomando alícuotas de 1 ml en intervalos de 2 horas durante 8 horas. Finalmente, transcurrido este tiempo, las muestras se analizaron mediante espectroscopia UV-vis.

---

### **2.7.5. Pruebas de degradación fotocatalítica con luz UV.**

La evaluación fotocatalítica bajo irradiación ultravioleta se llevó a cabo empleando una lámpara UV, con una longitud de onda de 254 nm. Los experimentos fotocatalíticos se realizaron empleando 70 ml de colorante rodamina B, con una concentración inicial de 5 ppm. Para asegurar el equilibrio de adsorción-desorción de la molécula en la suspensión, se colocó una pieza de mortero que se dejó en obscuridad durante 30 minutos. Posteriormente, la solución se colocó perpendicularmente para ser irradiada por la lámpara.

El grado de avance de la degradación fotocatalítica del contaminante se monitoreó mediante la técnica de espectroscopia UV-Vis. Para ello se tomaron alícuotas de la suspensión con un volumen de 1 ml, en intervalos de 2 horas, durante 24 horas. Transcurrido este tiempo, las muestras se centrifugaron y la concentración de Rodamina B se determinó por espectroscopia UV-vis.

### **2.8. Pruebas fotocatalíticas de reducción de CO<sub>2</sub> en fase acuosa.**

El proceso para la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> consiste en hacer pasar el gas de CO<sub>2</sub>, a diferentes presiones, por un reactor tipo Batch, que contiene agua y las muestras de mortero recubiertas con el fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub>.

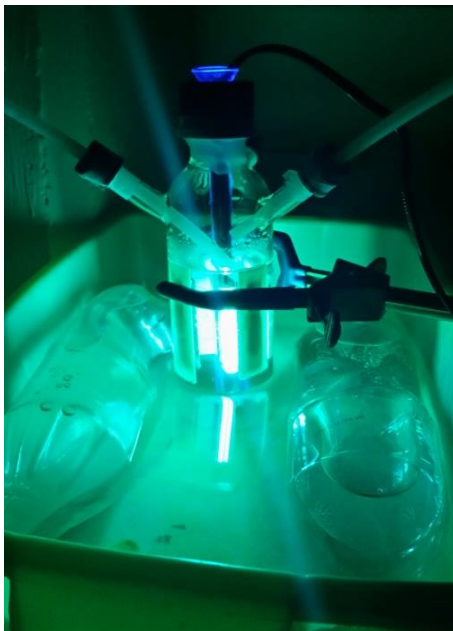
La foto reducción de CO<sub>2</sub> se llevó a cabo empleando un reactor de vidrio tipo Batch que contenía agua destilada y las muestras de mortero recubiertas

---

con pasta de SiC-TiO<sub>2</sub>. Se verificó que el reactor estuviera sellado correctamente para evitar fugas. Antes de la irradiación de la luz se realizaron purgas para eliminar el aire atrapado en el reactor. Después de haber realizado las purgas el gas CO<sub>2</sub> se introdujo en el reactor durante 1 hora, con el fin de establecer el equilibrio de adsorción-desorción y la saturación del CO<sub>2</sub> en el sistema y se mantuvo a una presión de 2 PSI durante la reacción. Para lograr una adecuada dispersión del CO<sub>2</sub> se utilizó agitación magnética a una velocidad de 400 rpm durante todo el periodo de la prueba.

La prueba se realizó en oscuridad, para evitar la interferencia de otro tipo de irradiación. La fuente de luz que se usó para activar la reacción fotocatalítica fue de luz ultravioleta, obtenida a partir de una lámpara de UV tipo pluma, con una longitud de 254 nm, tal como se muestra en la figura 13. El control de la temperatura de reacción se mantuvo constante colocando el reactor dentro de un baño de agua con hielo. El periodo de la prueba de reducción de CO<sub>2</sub> fue de 6 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se tomó una alícuota de aproximadamente 10 ml que fue analizada mediante la técnica de Ultra-Violeta visible, medida en un espectrofotómetro modelo UV-Vis-Nir Cary 5000, a una longitud de onda de 550 a 175 nm y por medio de cromatografía de gases, empleando un cromatógrafo Modelo 3700, Marca Varían Interfase Star 800.

Se realizaron, además, pruebas de control que consistían en una reacción utilizado como fuente de irradiación una lámpara de 254 nm, sin la presencia del fotocatalizador



**Figura 13.** Reactor fotocatalítico equipado empleado en las pruebas de reducción de CO<sub>2</sub>.

La reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> se realizó bajo tres variaciones de presión, con la finalidad de comprobar bajo qué condiciones era más eficiente el proceso. Se evaluó el efecto de la presión trabajando a presiones de 0, 2 y 4 PSI.

De igual modo, se realizó una serie de experimentos variando la temperatura y empleando temperaturas de 15, 25, 35 y 40 ° C.

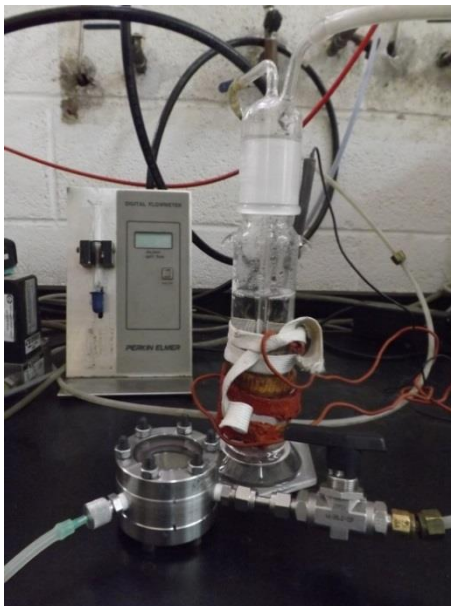
Así mismo, se realizó la comparación con diversas modificaciones de pH. Se trabajó a pH neutro, sin la adición de ningún agente modificador; sin embargo, también se evaluaron valores de pH ácido (3 y 5) que se ajustó añadiendo una solución diluida de ácido clorhídrico y en el caso del pH básico, este se ajustó utilizando una solución diluida de hidróxido de amonio.

---

Con el propósito de corroborar la reproducibilidad del proceso fotocatalítico, las muestras se sometieron a 3 ciclos sucesivos de foto reducción. Al finalizar cada ciclo, las muestras fueron enjuagadas con agua destilada y secadas en una estufa, a una temperatura de 100°C, durante 2 horas. Posteriormente, se colocaron el reactor con agua destilada y se repitió el procedimiento descrito con anterioridad.

## **2.9. Pruebas fotocatalíticas de reducción de CO<sub>2</sub> en fase gas.**

Las pruebas de reducción de CO<sub>2</sub> se llevaron a cabo empleando un reactor con una ventana de cuarzo de 30 ml. Se colocó la muestra de mortero dentro del reactor y se aseguró que no se presentaran fugas. Posteriormente, se conectó el flujo de gas CO<sub>2</sub> con saturador de humedad y se inició la purga introduciendo en el reactor un flujo de 30 ml/min durante un periodo continuo de 3 horas, hasta obtener un promedio de 2% de humedad, manteniendo una temperatura constante de 30°C, tal y como se muestra en la figura 14. Una vez concluido el periodo de purga, se cerró la válvula y se toma una muestra de 0.5 ml con la jeringa para gases y se inyecta en el cromatógrafo Autosystem XL de Perkin Elmer, para el análisis de las condiciones iniciales de la prueba.



**Figura 14.** Reactor de ventana de cuarzo y saturador de humedad.

Posteriormente se inició la irradiación de la muestra colocando sobre la ventana de cuarzo una lámpara UV de pluma de 254 nm, que se cubrió con papel aluminio para evitar interferencia de otro tipo de irradiación. El período de la irradiación de la muestra fue de 14 horas. Una vez transcurrido este tiempo, se tomó una muestra de 0.5 ml con la jeringa para gases y se inyectó en el cromatógrafo para su análisis.

---

## **CAPITULO 3. RESULTADOS.**

En el presente capítulo se muestran los resultados de este trabajo, correspondientes a la caracterización fisicoquímica de los materiales estudiados (SiC y TiO<sub>2</sub>), como fotocatalizadores en las muestras de materiales cementantes, de cemento gris y cemento blanco, empleados en pruebas fotocatalíticas de limpieza ambiental como son: degradación de rodamina B y reducción de CO<sub>2</sub>.

### **3.1. Caracterización del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>.**

#### **3.1.1 Difracción de rayos X del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>.**

En la figura 15 se muestra el difractograma correspondiente al compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> que fue sintetizado por microemulsión y posteriormente tratado térmicamente a 450°C. De acuerdo con las reflexiones observadas se determinó la presencia de las fases TiO<sub>2</sub> (anatasa, JCPDS 01-089-4203) y SiC (hexagonal y romboédrico JCPDS 00-049-1428 y JCPDS 01-073-1662, respectivamente). La presencia de la fase cristalina anatasa del TiO<sub>2</sub>, cuya reflexión principal se sitúa alrededor de 25.5 grados en 2 $\theta$ , se debió al método de síntesis empleado. En este caso no se observó la presencia de la fase

---

cristalina rutilo, ya que las condiciones suaves de reacción permitieron controlar la síntesis.

Este resultado es importante, ya que con base en reportes bibliográficos se ha establecido que la actividad fotocatalítica de la fase anatasa es mayor que la fase rutilo o mezclas de ambas [90]; es decir, en este caso, al tener únicamente la fase anatasa pura, puede ser un indicativo de que se tendrá una mejor actividad en los procesos fotocatalíticos involucrados.

Por otro lado, las fases del SiC corresponden claramente al material comercial  $\alpha$ -SiC, formado por los polimorfos romboédrico y hexagonal, cuyas reflexiones más intensas se encuentran aproximadamente a 36 grados en  $2\theta$  (polimorfo hexagonal) y en 34 grados en  $2\theta$  (polimorfo romboédrico) [91].

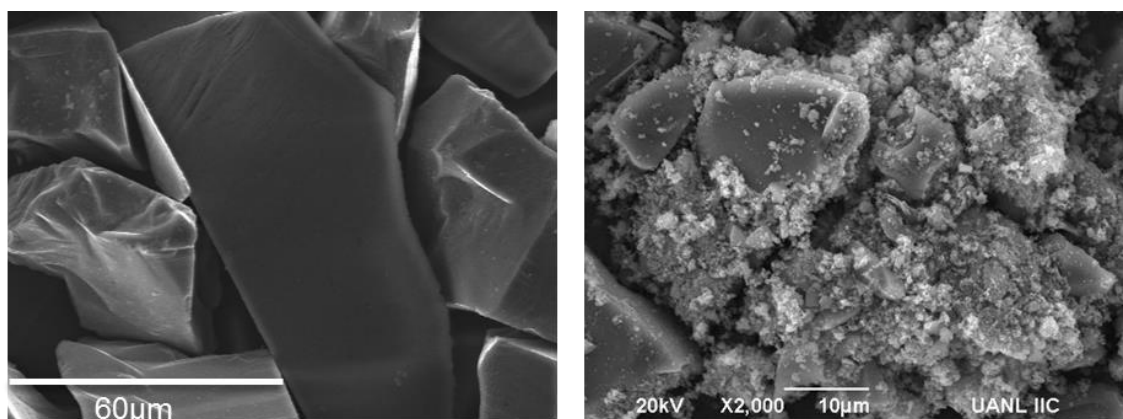
En conclusión, se puede decir que ambos materiales, SiC y  $\text{TiO}_2$  son cristalinos, presentando una mayor cristalinidad el SiC, debido a que es un material comercial. Además, se encontró que la síntesis por microemulsión del compuesto SiC- $\text{TiO}_2$  permitió obtener un material cristalino al ser preparado por un método en solución, sin que se presentara la presencia de fases adicionales ni impurezas en el material.





---

pero utilizando métodos de síntesis diferentes, como son la molienda mecánica y sol-gel. Se espera se favorezca la actividad fotocatalítica en este caso, ya que, de acuerdo con los reportes de los materiales de SiC-TiO<sub>2</sub> con estas características, éstos presentaron mejores resultados fotocatalíticos que cuando se cubrió totalmente la superficie de las partículas de SiC.



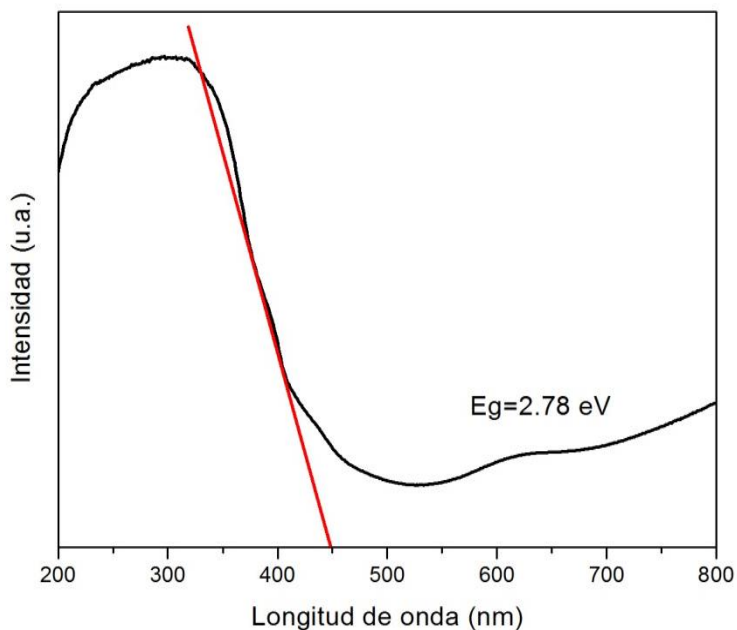
**Figura 16.** Micrografías de MEB a diferentes magnificaciones de: a) SiC comercial, b) SiC-TiO<sub>2</sub> sintetizado por microemulsión.

### 3.1.3. Determinación de ancho de banda prohibida de SiC-TiO<sub>2</sub>.

En la figura 17 se muestra el espectro de absorción del SiC-TiO<sub>2</sub> obtenido en reflectancia difusa, que fue utilizado para determinar su ancho de banda  $E_g$ . En este caso se puede observar que se presenta un ligero desplazamiento de la banda de absorción hacia una zona más cercana al visible entre los 200 y 450 nm, dando lugar a un valor de *band gap* de 2.78 eV. Este valor es menor que el  $E_g$  del TiO<sub>2</sub> (3.2 eV) y que el SiC (3.0 eV), por lo que se puede asumir que el compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> requerirá menor energía para

---

activarse y con ello disminuirá la probabilidad de recombinación del par hueco-electrón, que comúnmente se presenta en el  $\text{TiO}_2$ .



**Figura 17.** Espectros de UV-Vis del compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>.

En la tabla 7 se presentan los valores de ancho de banda prohibida  $E_g$ , calculados para el compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>, obtenidos a partir de sus espectros de reflectancia difusa. En esta misma tabla se presenta el valor de  $E_g$  obtenido por Sánchez-Díaz et. al., [49] para el SiC-TiO<sub>2</sub> sintetizado por molienda mecánica (2.78 eV) Este resultado permite inferir que, al igual que Sánchez-Díaz, la actividad del material cementante recubierto con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> se incrementará al llevar a cabo la degradación fotocatalítica de sustancias orgánicas.

---

**Tabla 6.** Valores de  $E_g$  de los materiales estudiados.

<b>Material</b>	<b>Método de síntesis</b>	<b>Energía de banda prohibida (<math>E_g</math>)</b>
SiC	Comercial	3.0
TiO <sub>2</sub> (P25)	Comercial	3.2
TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	3.0
SiC-TiO <sub>2</sub>	Molienda mecánica	2.8
SiC-TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	2.8

#### **3.1.4. Determinación de área superficial ( $S_{bet}$ ) del SiC-TiO<sub>2</sub>.**

El compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> presentó un valor de área superficial de 16 m<sup>2</sup>/g, que es menor al área superficial del TiO<sub>2</sub> sintetizado por microemulsión (97 m<sup>2</sup>/g) y del SiC comercial (20 m<sup>2</sup>/g). En este caso, la disminución en el valor de área superficial se debe principalmente al gran tamaño de las partículas de SiC y los aglomerados de TiO<sub>2</sub> sobre ellas, ya que el primero está en mayor proporción en la mezcla (relación 80:20). Aún así, el compuesto SiC-TiO<sub>2</sub> sigue presentando un área adecuada para ser utilizado en procesos fotocatalíticos.

---

### **3.2 Preparación y propiedades de los morteros de cemento gris y cemento blanco: porosidad y resistencia a la compresión**

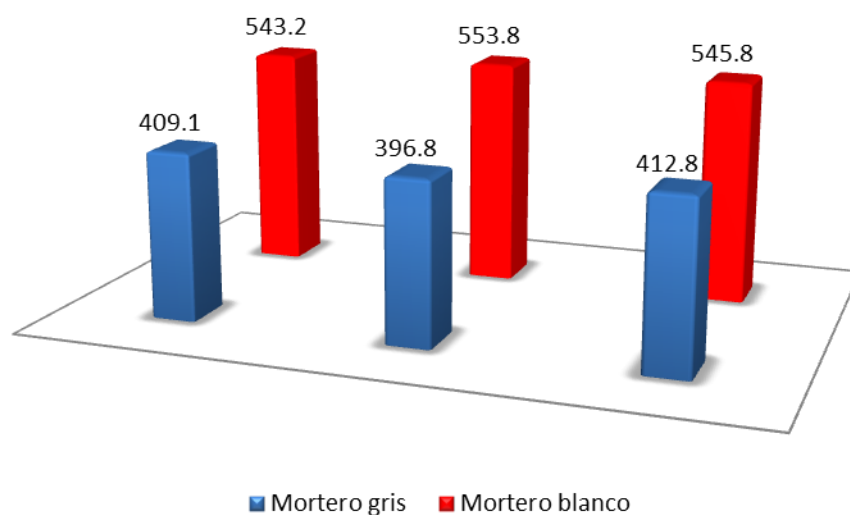
Se prepararon morteros siguiendo la norma ASTM-C109 y posteriormente fueron evaluados para conocer su porosidad y su resistencia a la compresión. Lo anterior debido al creciente interés en los materiales de cemento, ya sean pastas, morteros u hormigones, al emplearse como sustratos para el depósito de fotocatalizadores.

En la tabla 8 se presentan los valores de porosidad de las muestras de mortero gris y mortero blanco, antes y después de la aplicación del recubrimiento de  $\text{SiC-TiO}_2$ , así como su densidad aparente y su % de absorción. Se puede observar que la porosidad de las muestras de mortero gris es mayor que la porosidad de las muestras de mortero blanco, debido a la naturaleza de las materias primas empleadas. En este caso, el empleo de cemento blanco para la fabricación de los morteros favorece al llenado de los huecos entre las partículas del agregado fino, disminuyendo la porosidad y, al mismo tiempo, incrementando la resistencia mecánica de los morteros. También se determinó que una vez que las muestras de mortero fueron recubiertas con pastas de  $\text{SiC-TiO}_2$ , éstas presentaron una disminución en la porosidad, tanto en los morteros de cemento gris como en los morteros de cemento blanco. Esto se debe a que la pasta del recubrimiento llenó el interior de los poros en ambos morteros, sin embargo, las muestras de mortero gris siguen conservando una mayor porosidad después de aplicado el recubrimiento.

Por otra parte, al determinar la resistencia a la compresión de los morteros estudiados, se encontró que la diferencia de porosidad afecta de manera significativa esta propiedad, tal y como lo observaron Olivares et. al., [92]. En la figura 18, se puede observar que la tendencia indica un incremento superior al 25% de la resistencia del mortero de cemento blanco con respecto al mortero de cemento gris.

**Tabla 7.** Valores de porosidad de las muestras de mortero gris y mortero blanco antes y después del recubrimiento.

Muestras	Densidad aparente (gr/cm <sup>2</sup> )	Porosidad (% volumen)			% de Absorción
		Abierta	Cerrada	Total	
M. Gris sin Recubrimiento	2.2	16.5	1.8	18.4	7.5
M. Gris con Recubrimiento	2.2	14.6	1.7	16.4	7.3
M. Blanco sin Recubrimiento	1.7	13.5	1.2	14.8	7.8
M. Blanco con Recubrimiento	2.0	8.9	1.5	10.4	8.3



**Figura 18.** Pruebas mecánicas de resistencia a la compresión de muestras de mortero gris y mortero blanco

De acuerdo con los resultados obtenidos, los morteros preparados presentaron los valores mínimos de porosidad y resistencia que deben presentar los cuales son de 20% y 400 kg/cm<sup>2</sup>. Mientras que la presencia del recubrimiento del fotocatalizador no alteró significativamente estas propiedades. Por otro lado, se puede inferir que los morteros de cemento gris presentarán una mejor actividad fotocatalítica, en comparación con los morteros de cemento blanco, debido a su mayor porosidad; ya que, de acuerdo con lo reportado por Lucas et. al., [93] al tener mayor porosidad se tiene mayor capacidad de absorción y adsorción de los contaminantes orgánicos, lo que permitirá una mejor eficiencia fotocatalítica.

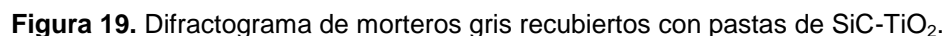
---

### **3.3. Caracterización estructural, morfológica y fisicoquímica de los morteros de cemento gris con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.**

#### **3.3.1 Difracción de rayos X de morteros de cemento gris con recubrimientos del SiC-TiO<sub>2</sub>.**

Los morteros de cemento gris recubiertos con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> y tratados térmicamente a 400°C, se caracterizaron mediante difracción de rayos X. En la figura 19 se muestra el difractograma obtenido de los morteros con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub>. En éste, se pueden identificar reflexiones bien definidas y de gran intensidad, correspondientes al SiO<sub>2</sub> (arena sílica), que es el material usado como agregado fino y es el que se encuentra en mayor proporción en las muestras de mortero empleadas. Así mismo, se observa la presencia, en menor proporción, del TiO<sub>2</sub> en su fase anatasa, SiC comercial y el silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), este último es el constituyente mayoritario del cemento Portland. Es importante mencionar que no se observa la presencia de otras fases secundarias en el sustrato de mortero después del tratamiento térmico.



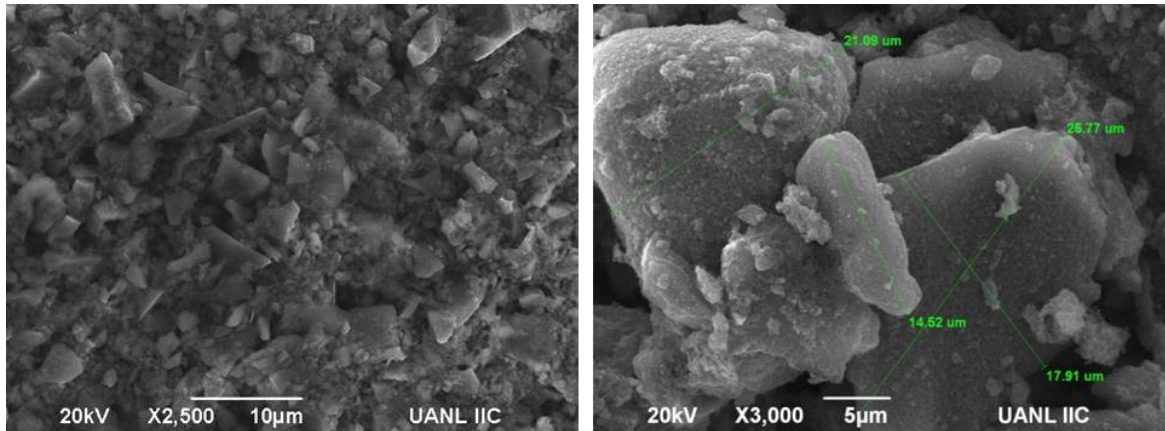


En las figuras 20a y 20b se observan las micrografías de los morteros de cemento gris recubiertos con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub>. En este caso se puede observar que el mortero está cubierto homogéneamente por la pasta, exhibiendo una morfología de partículas irregulares de tamaño aproximado de 50 µm, que es el tamaño promedio del semiconductor SiC comercial.

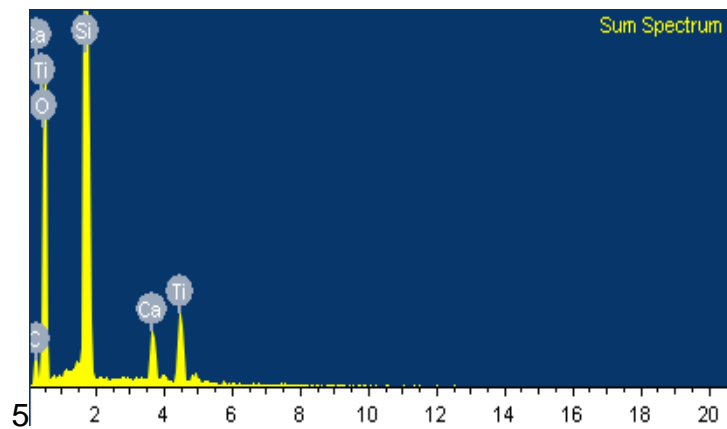
67

---

recubrimientos; en este caso, el análisis se realizó en varias zonas del sustrato de mortero mostrando resultados similares, ver figura 21.



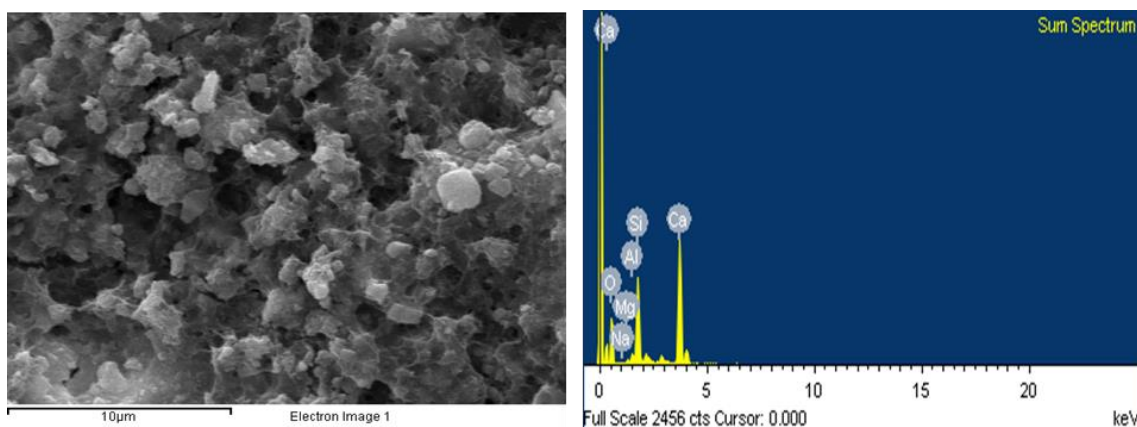
**Figura 20.** a) Micrografías de MEB de mortero gris con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> b) tamaño de partículas de SiC-TiO<sub>2</sub>.



**Figura 21.** EDS de mortero gris con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.

---

A diferencia de los morteros recubiertos con  $\text{SiC-TiO}_2$ , el mortero sin recubrir presentó una morfología irregular y rugosa, conformada por partículas de los silicatos de calcio hidratado (C-S-H), así como la presencia de partículas libres que todavía se encuentran en proceso de unión debido al continuo proceso de hidratación tal y como se muestran en la figura 22 a). El análisis por EDS corroboró la presencia de los elementos típicos de los morteros. como son: calcio, aluminio, sodio, magnesio, oxígeno y silicio. Ver la figura 22 b).



**Figura 22.** a) Micrografías MEB de mortero gris sin recubrir b) EDS de mortero gris sin recubrir.

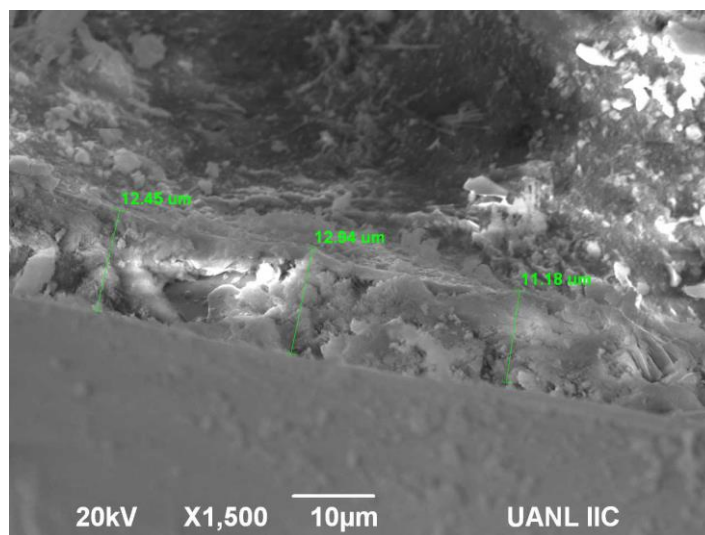
### 3.3.3. Espesor del recubrimiento de $\text{SiC-TiO}_2$ en mortero de cemento gris.

La cantidad de recubrimiento fotocatalítico depositado en las muestras de mortero gris se determinó mediante la técnica de gravimetría, tomando en cuenta el peso antes y después de la aplicación del recubrimiento, los resultados indicaron que la cantidad promedio de recubrimiento depositado en las muestras fue de 24 mg, es decir,  $1.92 \text{ mg/cm}^2$ .

---

El espesor de los recubrimientos fue evidenciado a través de la técnica de microscopia electrónica de barrido, donde se pudo apreciar en las micrografías que el grosor del espesor es de aproximadamente  $12\text{ }\mu\text{m}$  y que es homogéneo. Esto puede apreciarse en la figura 23, donde se observa claramente el sustrato de textura lisa correspondiente al mortero gris sin recubrir, separada por una línea que corresponde al recubrimiento de  $\text{SiC-TiO}_2$ . Además se observa un claro anclaje entre las partículas del compuesto  $\text{SiC-TiO}_2$  y la muestra de mortero.

Es importante mencionar que debido a la técnica de depósito empleada, el grosor de la película no es muy fino y además presenta una superficie rugosa, lo cual podría favorecer la adsorción de las moléculas orgánicas y con ello favorecer su degradación durante el proceso fotocatalítico.

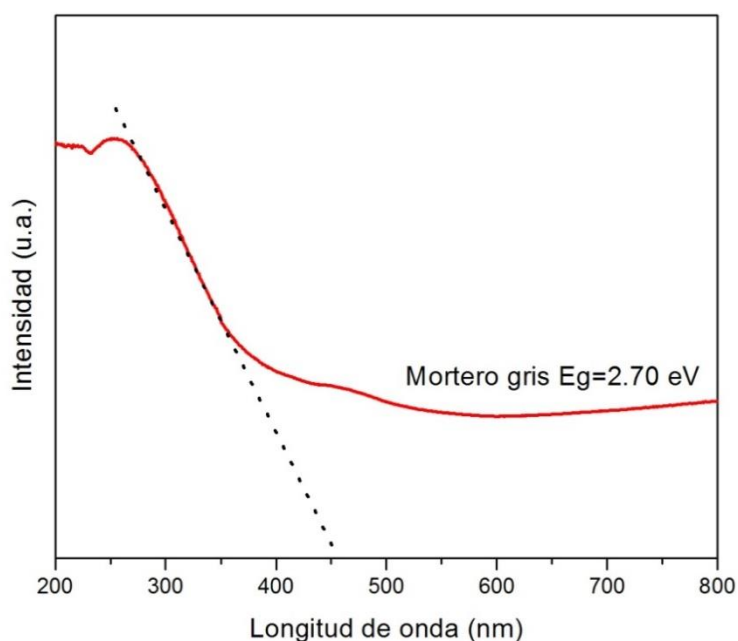


**Figura 23.** Micrografías MEB de espesor mortero gris con recubrimiento de  $\text{SiC-TiO}_2$ .

---

### 3.3.4. Determinación del ancho de banda prohibida de morteros de cemento gris recubierto con SiC- TiO<sub>2</sub>.

En la figura 24 se muestra el espectro de UV-Vis correspondiente a la muestras de mortero de cemento gris recubierto con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> y posteriormente calcinados a 400°C. Se observa claramente que la banda de absorción que presenta este material se encuentra desplazada hacia longitudes de onda mayores que 400 nm, lo que indica que este material preparado está absorbiendo en la región del visible.



**Figura 24.** Espectros de UV-Vis de morteros recubiertos con SiC- TiO<sub>2</sub>.

Así mismo, de acuerdo con el valor de  $E_g$  obtenido a partir de esta gráfica, cuyo valor es de 2.7 eV, la energía necesaria para que un fotón excite a un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción del TiO<sub>2</sub> en el

compuesto SiC-TiO<sub>2</sub>, será menor que la energía requerida por el TiO<sub>2</sub> de manera individual (3.05 eV), lo que es interesante, ya que estos materiales podrán aprovechar la energía de la luz solar para activarse.

En la tabla 9 se presentan los valores de energía de banda prohibida ( $E_g$ ) de los fotocatalizadores SiC, TiO<sub>2</sub>, SiC-TiO<sub>2</sub> y mortero gris con SiC-TiO<sub>2</sub>. Se puede apreciar que cuando el TiO<sub>2</sub> está unido al SiC, el  $E_g$  tiende a disminuir su valor por debajo de los 3.0 eV, indicando que estos materiales pueden ser activos bajo luz visible.

**Tabla 8.** Propiedades ópticas UV-Vis de los materiales empleados

<b>Material</b>	<b>Método de síntesis</b>	<b>Energía de banda prohibida (<math>E_g</math>)</b>
SiC	Comercial	3.0
TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	3.05
SiC-TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	2.78
Mortero Gris SiC-TiO <sub>2</sub>	----	2.7

### 3.3.5. Área superficial del mortero de cemento gris con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.

El recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> sobre mortero gris provocó un incremento en el valor del área superficial específica, comparado con el mortero sin recubrir, lo que seguramente favorecerá la actividad fotocatalítica de estos materiales, como ha ocurrido en otros casos. En la tabla 10 se muestran los

---

valores obtenidos de área superficial específica, donde es claro apreciar que las muestras de mortero de cemento gris sin recubrimiento presentan valores de área superficial alrededor de  $9 \text{ m}^2/\text{g}$ , mientras que los morteros con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> presentaron valores de área superficial alrededor de  $16 \text{ m}^2/\text{g}$ . Este valor es superior al reportado por Sánchez-Díaz ( $8.57 \text{ m}^2/\text{g}$ ) para muestras de mortero de cemento con SiC-TiO<sub>2</sub> agregado en el proceso de mezclado [49]. Es decir, en este caso aún y cuando el material está depositado en forma de película, sigue manteniendo un valor de área superficial considerable, sobre todo teniendo en cuenta que se está utilizando una proporción de 20% de TiO<sub>2</sub> y 80% de SiC en las pastas utilizadas para recubrir los morteros.

**Tabla 9.** Valores de área superficial  $S_{BET}$  del SiC-TiO<sub>2</sub> y morteros de cemento gris con y sin recubrimiento.

Muestra		Área $S_{BET}$ ( $\text{m}^2/\text{g}$ )
TiO <sub>2</sub>	Comercial	50
TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	97
SiC	Comercial	20
SiC-TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	15
Mortero gris	Sin recubrimiento	9
Mortero gris	Recubrimiento SiC-TiO <sub>2</sub>	16

---

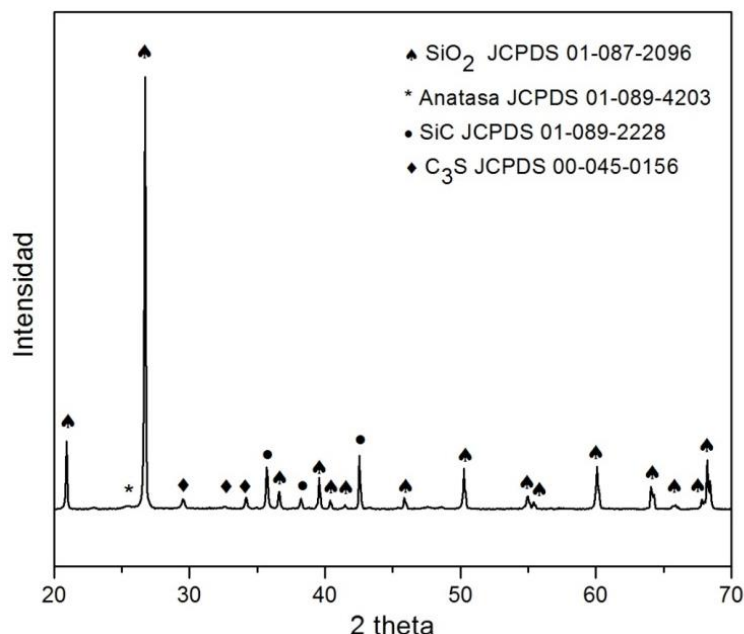
### **3.4. Caracterización estructural, morfológica y fisicoquímica de los morteros de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.**

#### **3.4.1 Difracción de rayos X de morteros de cemento blanco con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub>.**

Con la finalidad de determinar si la naturaleza del tipo de cemento podría influir en la actividad fotocatalítica, se llevó a cabo la preparación de muestras de morteros de cemento blanco con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub> y tratadas térmicamente a 400°C. En la figura 25 se muestra el difractograma de los morteros de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>. Al igual que en el caso de los morteros preparados con cemento gris se observa que la reflexión de mayor intensidad se presenta en el ángulo de  $2\theta=27.5$  y corresponde al dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) que se utiliza como agregado en los morteros.

En esta misma figura se detectaron reflexiones correspondientes al silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S), al SiC comercial y TiO<sub>2</sub> anatasa, los cuales indicaron que no se presentó reacción alguna durante la preparación de los morteros de cemento blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub>.





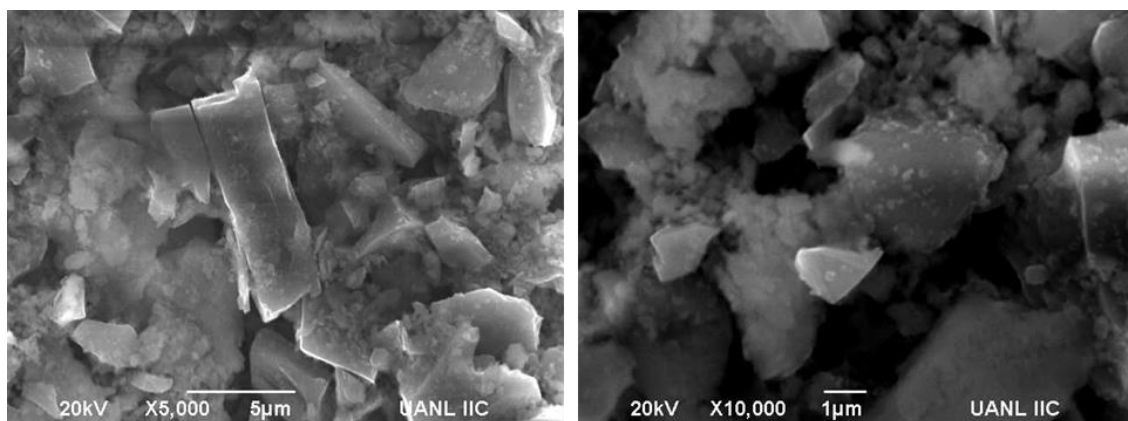
**Figura 25.** Difractograma de mortero blanco recubiertos con pastas de  $\text{SiC-TiO}_2$ .

### 3.4.2. Análisis de microscopía electrónica de barrido de mortero blanco recubierto con $\text{SiC-TiO}_2$ .

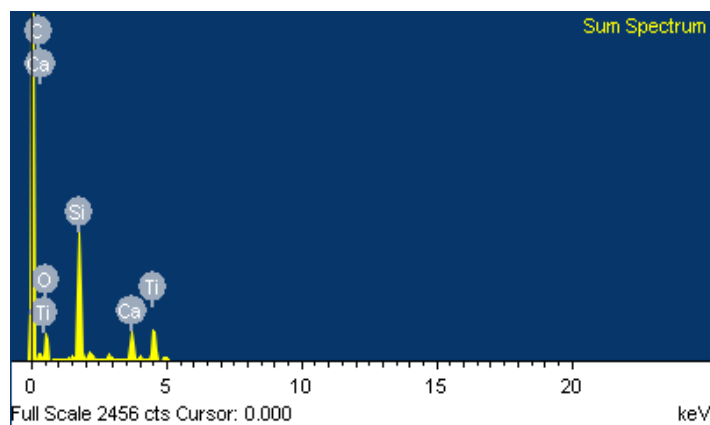
En las micrografías de la figura 26 se observa la morfología que presentan los morteros de cemento blanco recubiertos con pastas de  $\text{SiC-TiO}_2$  y calcinado a 400°C. En las imágenes se puede apreciar claramente que el mortero está totalmente recubierto por la pasta de  $\text{SiC-TiO}_2$ . Además, se logró identificar claramente las partículas del  $\text{SiC-TiO}_2$ , que presentan una morfología irregular y heterogénea de diversos tamaños que varían desde 1 a 100  $\mu\text{m}$ . Incluso se observó que en algunas zonas la pasta de  $\text{SiC-TiO}_2$  se aglomeró sobre la superficie del mortero.

---

Por otro lado, mediante el análisis de rayos X de EDS mostrado en la figura 27, se confirmó la presencia de Ti y Si, que corrobora que las muestras tienen una cantidad importante de SiC y TiO<sub>2</sub> sobre la superficie de los recubrimientos.



**Figura 26.** Micrografías MEB de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.

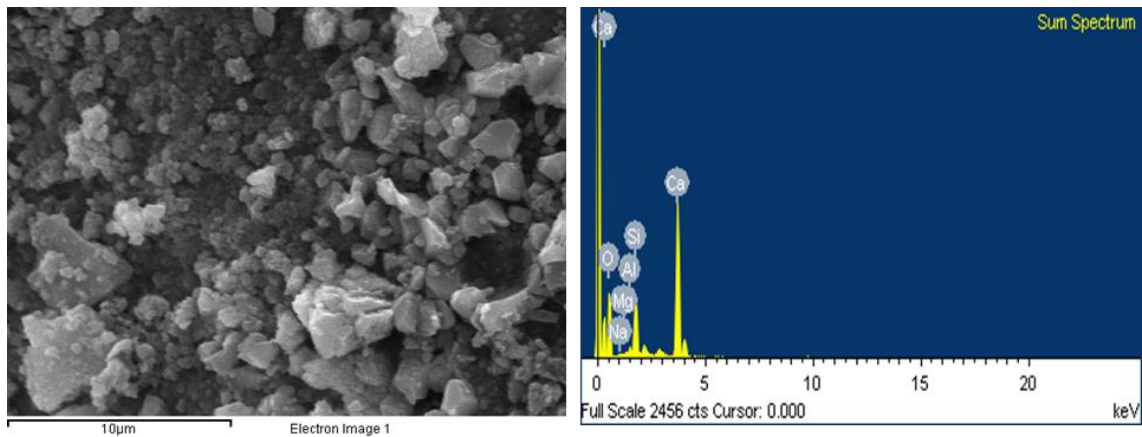


**Figura 27.** EDS de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.

---

En comparación con lo observado en las muestras de mortero de cemento gris recubiertas con el fotocatalizador, las micrografías del mortero de cemento blanco sin recubrir mostraron una morfología muy diferente, formada por partículas de diferentes tamaños y formas, las cuales fueron asociadas con los diferentes componentes del mortero. Ver la figura 28a. Es posible apreciar una superficie rugosa, la que podría favorecer que se tenga una mayor retención del fotocatalizador en la superficie del mortero, según lo reportado por Graziani et. al., [23].

De igual manera, en la figura 28b se presenta el análisis por EDS que mostró la presencia de los elementos: calcio, aluminio, sodio, magnesio, silicio y oxígeno, correspondientes a la composición química del material cementante.

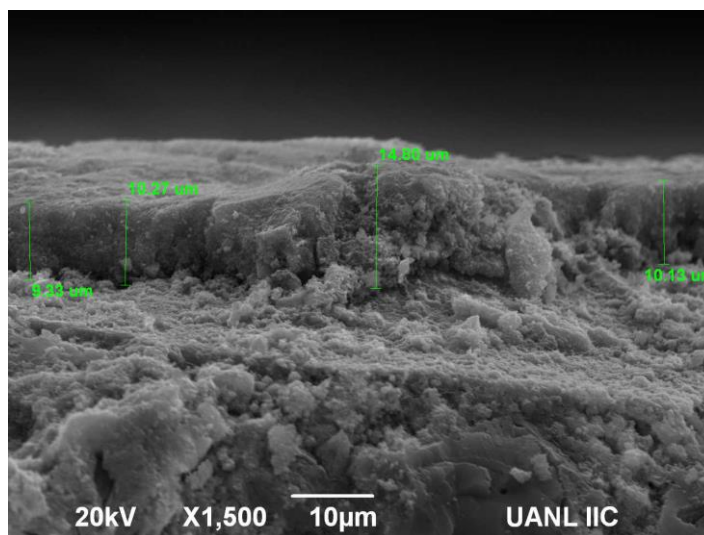


**Figura 28.** a) Micrografías MEB de mortero blanco sin recubrimiento b) EDS mortero blanco sin recubrimiento.

---

### 3.4.3. Espesor del mortero blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub>.

Al igual que en el caso de las muestras de mortero gris recubiertas con SiC-TiO<sub>2</sub>, el espesor del recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> de las muestras de mortero blanco se determinó por microscopia electrónica de barrido. En la figura 29 se puede observar la micrografía de la muestra de mortero blanco recubierta con SiC-TiO<sub>2</sub>, donde se aprecia que el recubrimiento no tiene un espesor homogéneo, ya que los valores de espesor obtenidos varían desde 9 a 14  $\mu\text{m}$  aproximadamente. En este caso, la superficie del recubrimiento presenta un aspecto de mayor rugosidad, lo que podría favorecer la adsorción de moléculas contaminantes y se podría facilitar su eliminación.

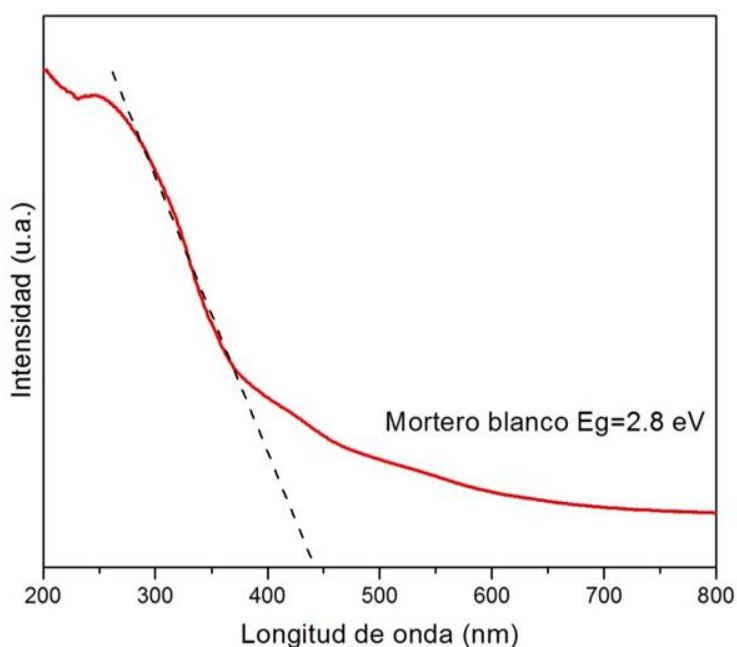


**Figura 29.** Micrografías MEB de espesor de mortero blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.

---

#### 3.4.4. Determinación del ancho de banda prohibida del mortero de cemento blanco con recubierta de SiC- TiO<sub>2</sub>.

En la figura 30 se muestra el espectro de UV-Vis de mortero blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub>, donde se puede observar que, al igual que las muestras de mortero gris, la absorción de este material se presenta a longitudes mayores que 400 nm; es decir, en la región del visible.



**Figura 30.** Espectros de UV-Vis de mortero blanco recubierto con SiC- TiO<sub>2</sub>.

En la tabla 11 se muestra que el valor de  $E_g$  obtenido para este material es de 2.8 eV. Este valor es muy similar al que se obtuvo para las muestras de mortero gris, debido a que al estar la pasta de SiC-TiO<sub>2</sub> recubriendo la superficie del mortero, será ésta la única responsable de la absorción. Por lo tanto, al igual que en el caso de los morteros de cemento gris, los morteros de

cemento blanco podrán ser emplearse bajo irradiación de luz visible en procesos fotocatalíticos.

**Tabla 10.** Propiedades ópticas UV-Vis de los materiales empleados.

<b>Material</b>	<b>Método de síntesis</b>	<b>Energía de banda prohibida (<math>E_g</math>)</b>
SiC	Comercial	3.0
TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	3.05
SiC-TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	2.78
Mortero Blanco SiC-TiO <sub>2</sub>	----	2.8

#### **3.4.5. Área superficial del mortero de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>.**

La muestra de mortero de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> presentó un valor de área superficial de 8 m<sup>2</sup>/g, que es menor que el presentado por el mortero de cemento gris. Por lo que, si la actividad fotocatalítica dependiera únicamente del área superficial, se podría inferir que la muestra de mortero con cemento blanco presentará menor actividad fotocatalítica. En la tabla 12 se muestran los valores de área superficial específica de los materiales utilizados en la elaboración de morteros de cemento blanco.

---

**Tabla 11.** Valores Área superficial  $S_{BET}$  del SiC-TiO<sub>2</sub> y morteros de blanco.

Muestra		Área $S_{BET}$ (m <sub>2</sub> /g)
TiO <sub>2</sub>	Comercial	50
TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	97
SiC	Comercial	20
SiC-TiO <sub>2</sub>	Microemulsión	15
Mortero blanco	Sin recubrimiento	6
Mortero blanco	Recubrimiento SiC-TiO <sub>2</sub>	8

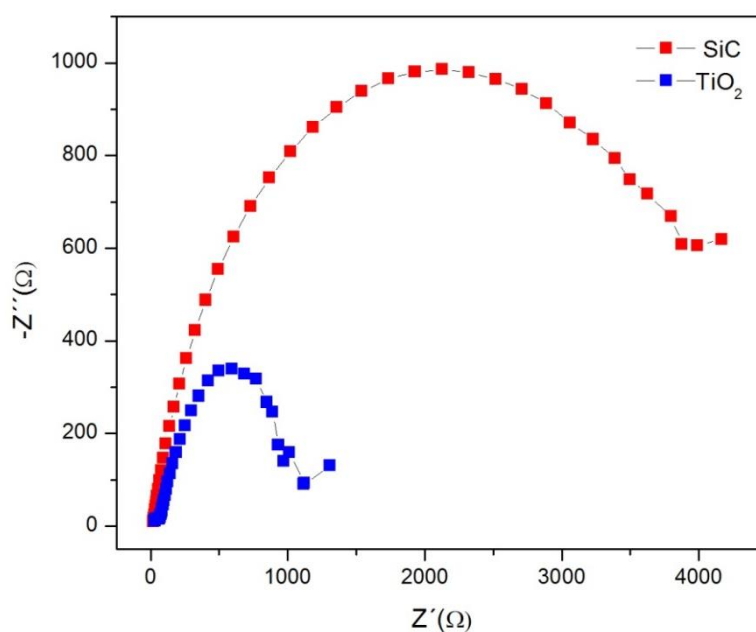
### 3.5. Determinación de estructura de bandas del SiC-TiO<sub>2</sub>.

La posición de la banda de valencia y conducción de cada uno de los materiales semiconductores empleados como recubrimiento en los morteros gris y blanco, se determinó usando la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica en modo potenciostático. El intervalo de potencial empleado en el caso de SiC fue de -1.28 a -1.5 V vs. Ag/AgCl y para el caso de TiO<sub>2</sub> entre -1.0 a 0 V vs. Ag/AgCl.

La Figura 30 muestra la comparación entre dos espectros de impedancia obtenidos a -1.28 y -1.0 V vs. Ag/AgCl correspondientes al SiC y TiO<sub>2</sub>, respectivamente. Los resultados de impedancia se representaron en forma de Diagrama de Nyquist, que se generan graficando en el eje de las abscisas la resistencia real ( $Z' \Omega$ ) y en el eje de las ordenadas la resistencia imaginaria ( $Z'' \Omega$ ). En la Figura 31 es claro observar que ambos espectros presentan un

---

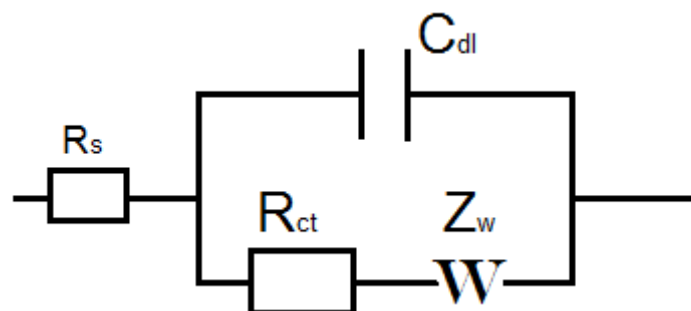
solo bucle farádico, que contiene una línea recta a bajas frecuencias. Este comportamiento está asociado con procesos de transferencia de carga bajo control difusional. Es importante señalar que un comportamiento similar se observó para todos los espectros de impedancia a los diferentes potenciales y para los dos materiales semiconductores. Estos resultados indican que el valor de la resistencia a la transferencia de carga es menor en el  $\text{TiO}_2$ .



**Figura 31.** Diagrama de Nyquist de los fotocatalizadores SiC y  $\text{TiO}_2$ .

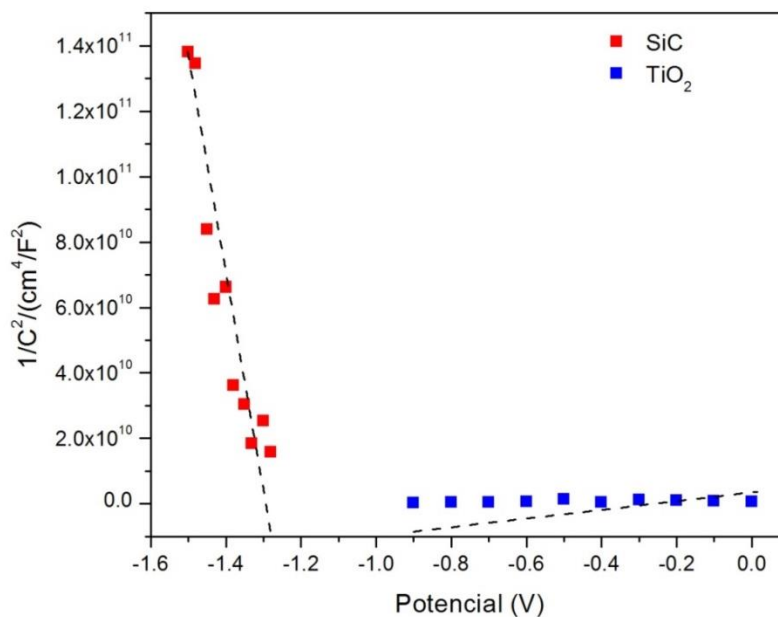
A partir de los datos experimentales de impedancia fue posible calcular el valor de la capacitancia usando un método de ajuste. El ajuste se llevó a cabo mediante el método de circuitos equivalentes, como el mostrado en la figura 32.





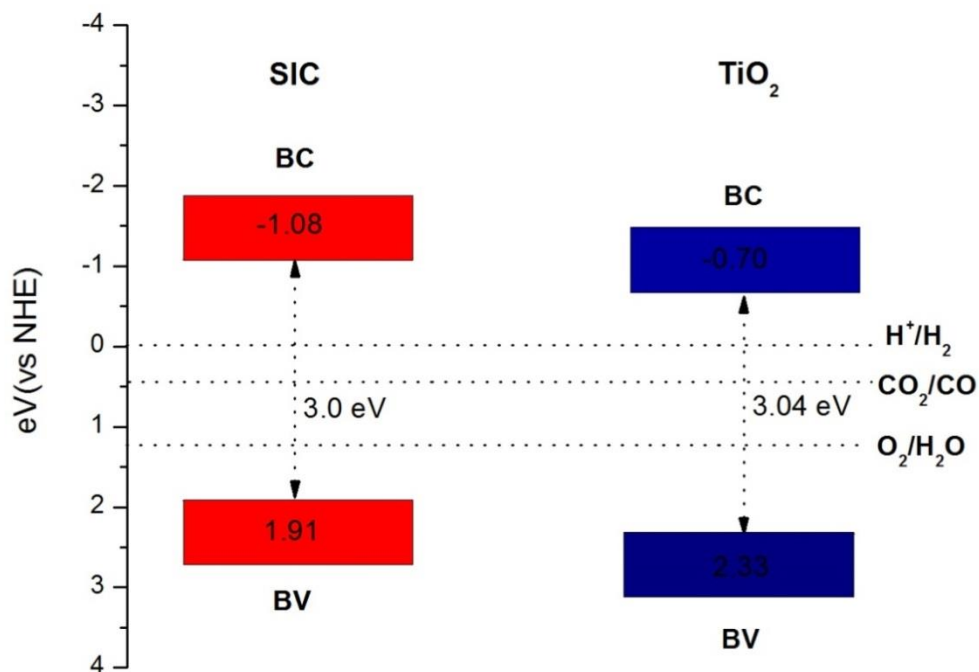
**Figura 32.** Circuito equivalente Randles, donde  $R_s$  representa la resistencia de la solución electrolítica,  $R_{ct}$  la resistencia a la transferencia de carga y  $C_{dl}$  la capacitancia a la doble capa.

En la figura 33 se muestran los diagramas Mott-Schottky, de los cuales se puede conocer directamente el valor de borde de banda valencia, que se obtiene trazando una pendiente a través de los puntos de la curva. En este caso, se puede apreciar que el fotocatalizador SiC presenta una pendiente negativa, lo que indica que este material es un semiconductor tipo  $p$ , y que, como se mencionó previamente, su valor de  $E_g$  es de 3.0 eV, con lo cual se determinó que sus respectivos valores de banda de conducción y de valencia son  $E_{BC}$  de -1.08 eV y  $E_{BV}$  de 1.91 eV. Por otra parte, al observar el diagrama correspondiente al  $TiO_2$ , éste presenta una pendiente positiva, correspondiente a un semiconductor tipo  $n$  y cuyo valor de  $E_g$  es de 3.05 eV. En este caso, sus respectivos valores de banda de conducción y de valencia son  $E_{BC}$  de -0.70 eV y  $E_{BV}$  de 2.33 eV.



**Figura 33.** Diagramas de M-S obtenidos a diferentes potenciales para SiC y TiO<sub>2</sub>.

Estos valores se calcularon en función del potencial normal de hidrógeno (NHE) a pH 7, y se representaron en la figura 34. Como puede apreciarse en esta figura, los potenciales de ambos fotocatalizadores están por encima de los potenciales de reducción y oxidación del agua. Lo anterior permite asumir que estos semiconductores pueden utilizarse ya sea para llevar a cabo la degradación de compuestos orgánicos, producir hidrógeno a partir de la disociación de la molécula de agua y/o la reducción del CO<sub>2</sub>.



**Figura 34.** Estructura de bandas para los fotocatalizadores SiC y TiO<sub>2</sub>.

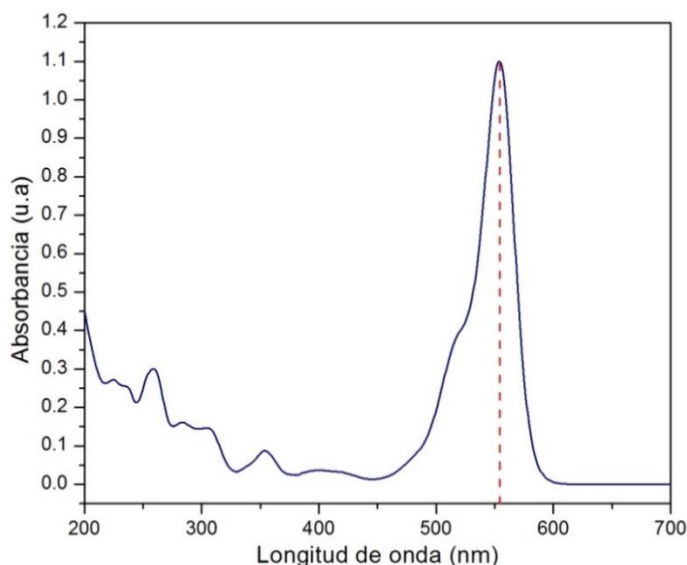
Los resultados anteriormente mostrados ayudaron a comprender mejor las propiedades electrónicas intrínsecas de los fotocatalizadores SiC y TiO<sub>2</sub>, ya que a través de su estructura de bandas es posible inferir su comportamiento fotocatalítico en las diversas reacciones en las cuales estarán participando.

### 3.6. Desempeño fotocatalítico en la degradación de rodamina B de las muestras de mortero gris y mortero blanco recubiertas con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub>.

La actividad de auto-limpieza de los morteros recubiertos con pastas de SiC-TiO<sub>2</sub> se evaluó por espectroscopía de UV-Vis para monitorear la evaluación de la degradación de la molécula de Rodamina B en fase acuosa. En la figura

---

35 se muestra el espectro de absorción del colorante Rodamina B, donde se puede apreciar que la banda máxima de absorción se presenta en 554 nm, tomando ésta como referencia para cuantificar la actividad fotocatalítica de las muestras de mortero gris y mortero blanco.



**Figura 35.** Espectro de absorción para la solución de Rodamina B sin irradiar.

### 3.6.1. Irradiación con simulador solar.

Antes de realizar las pruebas fotocatalíticas de los morteros con fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> para la degradación de Rodamina B bajo luz solar simulada, se llevó a cabo la prueba de fotólisis, que se realizó con el propósito de observar el efecto de la radiación emitida por el simulador solar sobre el colorante. En la figuras 36 y 37 se puede observar el comportamiento de las curvas de fotólisis obtenidas después de 8 horas de irradiación, así como las

---

curvas de degradación de la Rodamina B al emplear los morteros gris y blanco recubiertos con el SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador. En este caso se observa que el efecto de la fotólisis es mínimo bajo este tipo de irradiación, por lo que la actividad fotocatalítica que presenten por las muestras de mortero será atribuida directamente a la presencia del SiC-TiO<sub>2</sub>.

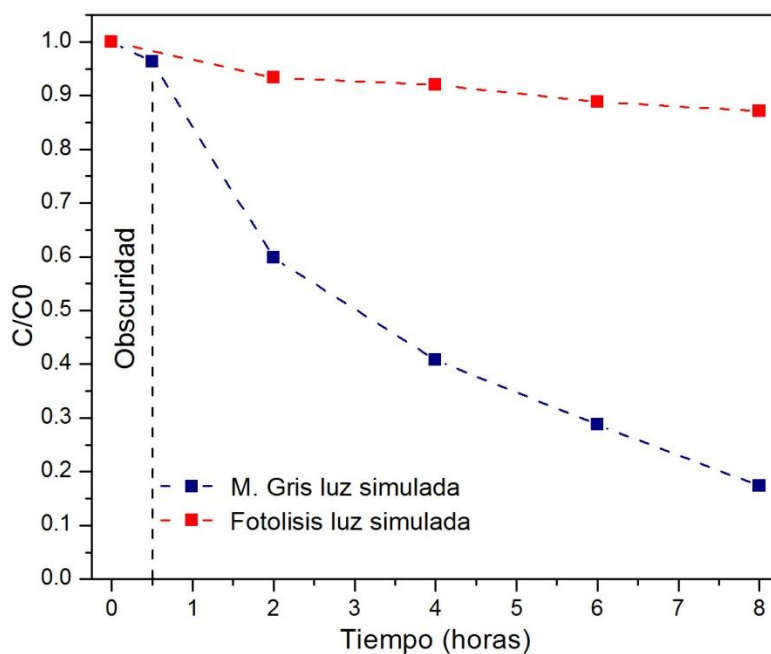
Es importante mencionar, que antes de encender la lámpara para iniciar las pruebas fotocatalíticas, la solución de Rodamina B se dejó en contacto con el material por 30 minutos, bajo condiciones de obscuridad. Esto se hizo con la finalidad de que el sistema alcanzara el equilibrio de adsorción-desorción. Al paso de este tiempo se tomó una muestra para analizarla y el resultado mostró una mínima adsorción del colorante en el material, por lo que se asumió que la actividad fotocatalítica que presenten estas muestras de mortero será atribuida directamente a la presencia del SiC-TiO<sub>2</sub>.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede decir que al utilizar el mortero gris recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador, se logra la mayor decoloración de este colorante, después de 8 horas de exposición continua a la irradiación solar simulada. Es evidente que, cuando se inicia la irradiación con el simulador solar, la concentración del colorante va disminuyendo a medida que se incrementa el tiempo de exposición. Esto se debe a que el recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> en las muestras de mortero facilita la oxidación del colorante Rodamina B.

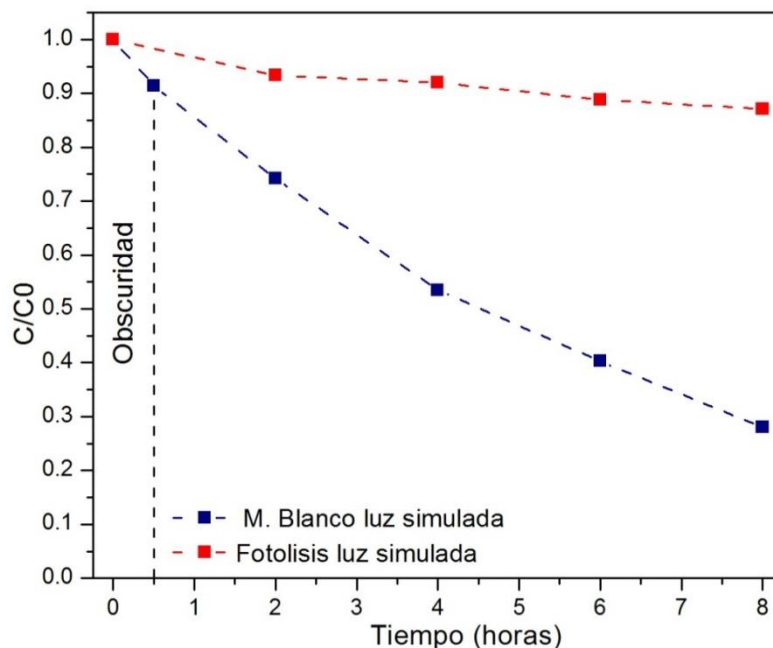
En la tabla 13 se presentan los porcentajes de decoloración de las muestras de mortero gris y morteros blanco. En este caso, se alcanzaron porcentajes altos de decoloración después de 8 horas de irradiación; 80% para la muestra de mortero gris y 73% para la muestra de mortero blanco.

**Tabla 12.** Porcentajes de decoloración de Rodamina B expuestas a irradiación solar simulada.

Tipo de Recubrimiento	Tipo de Mortero	% Decoloración
SiC-TiO <sub>2</sub>	Gris	83
	Blanco	71



**Figura 36.** Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con simulador solar.



**Figura 37.** Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con simulador solar.

Es claro que, aunque ambas muestras presentan actividad fotocatalítica para degradar este colorante, la naturaleza del soporte (mortero gris y/o mortero blanco) influye significativamente en el comportamiento de la reacción.

Este resultado es superior al obtenido por Sánchez Díaz et. al., [49] quienes utilizaron el fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> mezclado con el cemento en la preparación de morteros auto-limpiantes, cuyo porcentaje de decoloración fue de 70%. Aunque es importante resaltar que el TiO<sub>2</sub> utilizado por Sánchez Díaz et. al., [46] fue el comercial (P-25 Degussa), mientras que en nuestro caso se utilizó el TiO<sub>2</sub> preparado por el método de microemulsión, que presenta un área superficial específica mayor.

---

En este caso, con base en el buen desempeño fotocatalítico mostrado anteriormente, se pudo establecer una relación entre la actividad fotocatalítica y el área superficial de los morteros: el mortero gris presentó el doble del valor de área que el mortero blanco (16 vs. 7 m<sup>2</sup>/g) incrementando su actividad fotocatalítica. Esto se debió a que se amplió el área de foto-respuesta del SiC-TiO<sub>2</sub> a la luz visible, lo cual favoreció la degradación de la rodamina B bajo irradiación solar simulada.

### **3.6.2. Irradiación con luz solar natural.**

Al igual que en el caso anterior, se llevó a cabo la prueba de degradación de rodamina B utilizando los morteros gris y blanco con SiC-TiO<sub>2</sub>, sólo que en este caso dichas pruebas se realizaron exponiendo la solución directamente al sol. En las figuras 38 y 39 se puede observar el comportamiento de las curvas de degradación, así como la correspondiente curva de fotólisis obtenida después de 8 horas de irradiación. En este caso se logró un porcentaje de decoloración cercano a 60% en la muestra de mortero gris, mientras que con la muestra de mortero blanco se alcanzó una decoloración del 57%. Dichos resultados son muy similares entre sí, por lo que podría concluirse que en el caso de exposición a radiación solar natural, tal parece que independientemente del tipo de mortero utilizado, el efecto fotocatalítico depende únicamente del recubrimiento SiC-TiO<sub>2</sub>. Es importante mencionar que



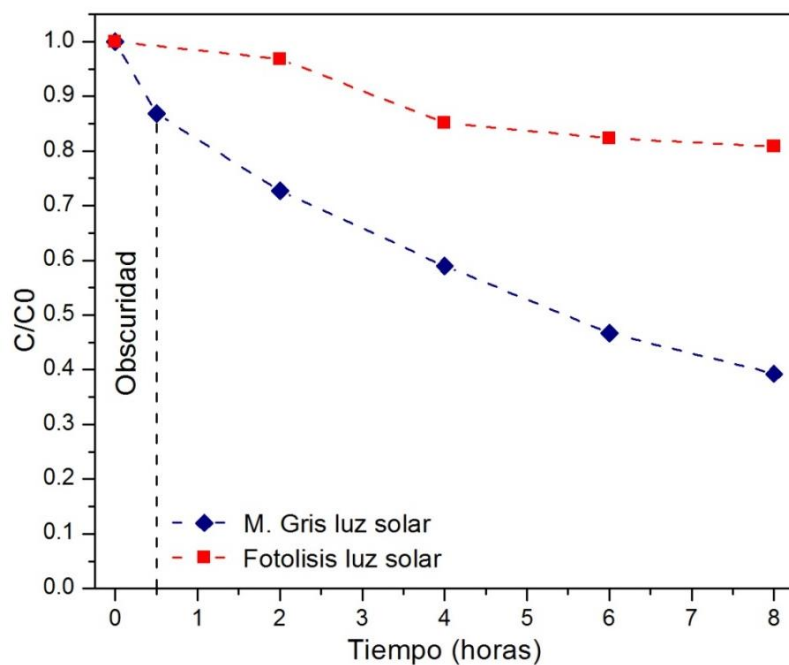
---

las pruebas de fotólisis y de adsorción indicaron una mínima decoloración, por lo que se puede considerar que su efecto no es significativo.

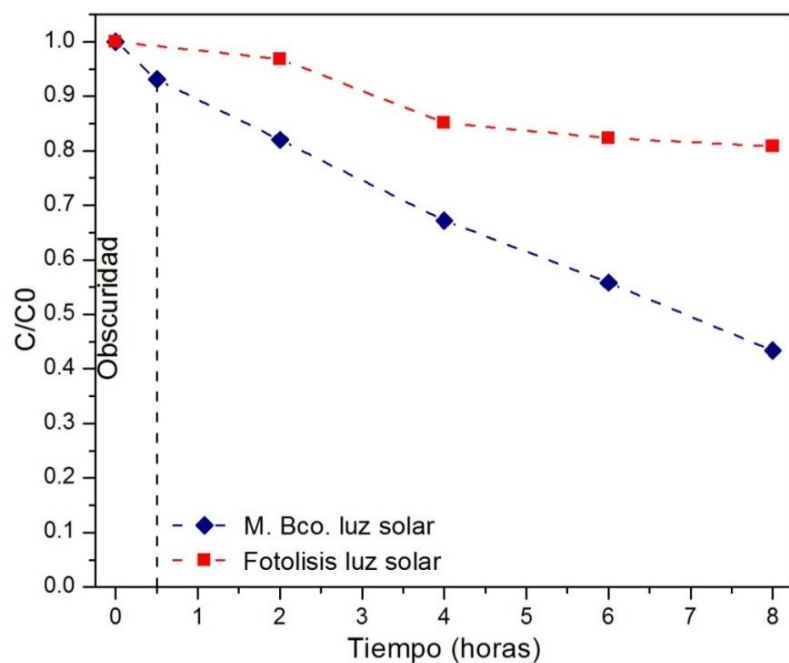
Se puede apreciar que se tiene un comportamiento muy similar al presentado por el material al ser irradiado por un simulador solar, mostrando una pendiente ligeramente más pronunciada con respecto a la muestra de mortero blanco. En ambos casos la decoloración se presenta de manera gradual, por lo que, como se mencionó anteriormente, se puede concluir que después de 8 horas de irradiación solamente se alcanza aproximadamente un 60% de decoloración, tal y como se observa en la tabla 14. Este porcentaje de degradación es un poco menor que el obtenido al utilizar como fuente de luz el simulador solar (80% vs. 60). Lo anterior se debe a que con el empleo del simulador solar se puede mantener la irradiación de manera constante durante las 8 horas y a una distancia controlada, mientras que en el caso de las pruebas bajo luz solar natural, no se tiene control de la distancia y además, con el paso del tiempo, la intensidad de la luz del sol va disminuyendo.

**Tabla 13.** Porcentajes de degradación de rodamina B expuestas a irradiación solar natural.

<b>Tipo de Recubrimiento</b>	<b>Tipo de Mortero</b>	<b>% Decoloración</b>
SiC-TiO <sub>2</sub>	Gris	60
	Blanco	57



**Figura 38.** Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz solar natural.



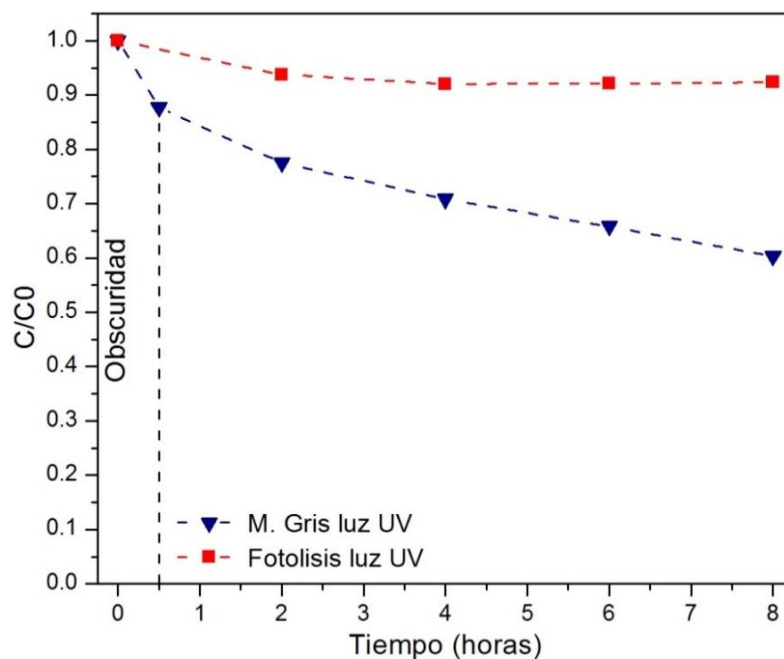
**Figura 39.** Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz solar natural.

---

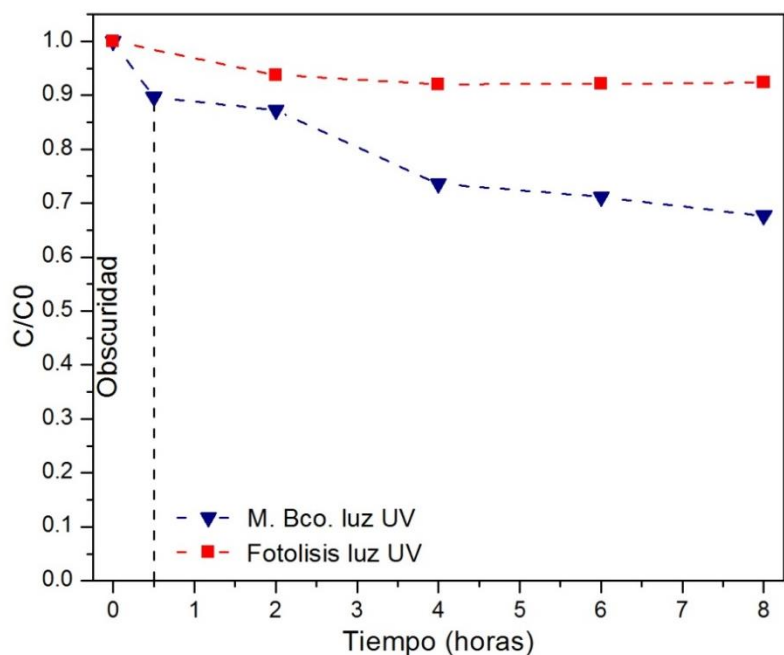
A manera de conclusión, se puede asumir que la actividad en este caso depende única y exclusivamente del fotocatalizador ( $\text{SiC-TiO}_2$ ) empleado como recubrimiento en los morteros y que la naturaleza de la luz irradiada también juega un papel importante en la activación del material.

### **3.6.3. Irradiación con luz UV.**

Con la finalidad de determinar el efecto fotocatalítico de las muestras de mortero recubiertas con  $\text{SiC-TiO}_2$  bajo irradiación UV, éstas fueron expuestas a irradiación con una lámpara de 254 durante 8 horas. Sin embargo, al igual que en los casos anteriores, fue necesario realizar las correspondientes pruebas de fotólisis y adsorción, encontrando una mínima variación en la decoloración del colorante. En las figuras 40 y 41 se muestra el comportamiento de las curvas de degradación obtenidas. Estas pruebas se realizaron bajo las mismas condiciones de trabajo que con las muestras bajo luz solar simulada y luz solar natural. Se encontró, que después de 8 horas de irradiación con luz UV, la decoloración de la Rodamina fue de aproximadamente 40%, siendo ligeramente superior la degradación utilizando el mortero de cemento gris, en comparación con el mortero blanco, tal como se muestra en la tabla 15.



**Figura 40.** Decoloración de Rodamina B en mortero gris recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz UV.



**Figura 41.** Decoloración de Rodamina B en mortero blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 8 horas de irradiación con luz UV.

---

**Tabla 14.** Porcentajes de decoloración de Rodamina B expuestas a luz UV.

<b>Tipo de Recubrimiento</b>	<b>Tipo de Mortero</b>	<b>% Decoloración</b>
SiC-TiO <sub>2</sub>	Gris	40
	Blanco	32

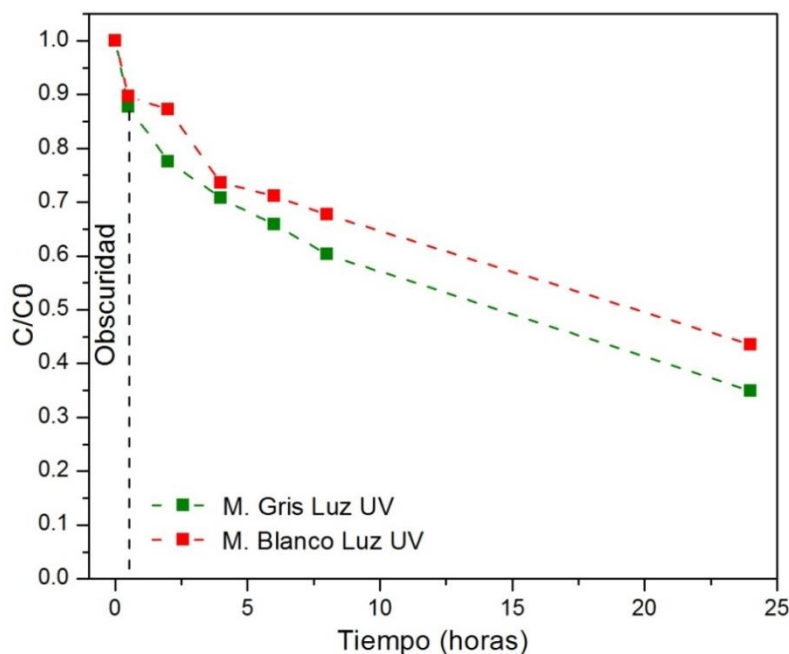
Con el propósito de evaluar la eficiencia fotocatalítica de los morteros gris y blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub>, éstos fueron expuestos por un mayor tiempo a la luz UV. En la figura 42 se puede apreciar que la eficiencia de la reacción fotocatalítica se incrementa, alcanzando una decoloración superior al 60%, después de 24 horas de irradiación, empleando ambos morteros recubiertos como fotocatalizadores, siendo el mortero gris el que mejor resultado presentó, en comparación con el mortero blanco.

Este resultado permite proponer a los morteros gris y blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub>, como materiales cementantes autolimpiantes, ya que cumplen los parámetros establecidos por la norma UNI 11258:2008 (Determinación de la actividad fotocatalítica de ligantes hidráulicos métodos de ensayos de Rodamina) [94]. Esta norma establece que un material cementante podrá ser considerado un material fotocatalítico autolimpiante cuando se logre alcanzar el 50% de degradación del colorante rodamina B, después de 24 horas de exposición [23].

De esta manera, los materiales estudiados en este trabajo cumplirán la norma UNI 11259:2008 [94] y podrán ser considerados como materiales

---

cementantes autolimpiantes para su aplicación en la industria de la construcción. Además, su eficiencia fotocatalítica podrá mejorarse al ser irradiados éstos con luz solar natural y/o luz solar simulada.



**Figura 42.** Decoloración de Rodamina B en mortero gris y blanco recubierto con SiC-TiO<sub>2</sub> en un periodo de 24 horas de irradiación con luz UV

En general, se encontró que los morteros gris y blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador, presentan actividad fotocatalítica para llevar a cabo la degradación de Rodamina B, y dicha actividad depende principalmente de la naturaleza de la luz irradiada y del área específica del material recubierto. Además, los resultados obtenidos en este trabajo fueron superiores a los reportados por otros autores, para muestras de mortero con fotocatalizador empleadas en la degradación fotocatalítica del colorante Rodamina B y que se muestran en la tabla 16. Tal es el caso del trabajo de Ruot [46], quien logró un

53% de degradación utilizando mortero con  $\text{TiO}_2$ , en un tiempo de exposición de 30 horas bajo radiación UV, mientras que Sánchez Díaz [49] obtuvo un 60% de degradación al utilizar un mortero que contenía una pequeña cantidad de  $\text{SiC-TiO}_2$ , en sustitución del cemento. En nuestro caso, el porcentaje de degradación alcanzado fue cercano al 80% utilizando el  $\text{SiC-TiO}_2$  como recubrimiento en morteros y radiación solar natural y/o simulada.

**Tabla 15.** Comparación de los resultados obtenidos con otros trabajos reportados.

<b>Fotocatalizador empleado en Mortero</b>	<b>Método de adición fotocatalizador</b>	<b>Tipo lámpara</b>	<b>Tiempo de exposición (horas)</b>	<b>% Degradación</b>	<b>Ref.</b>
$\text{TiO}_2$	Mezcla	UV 300 W	30	53	[31]
$\text{TiO}_2$	Mezcla	UV (espectro de 320 a 410 nm)	6	25	[71]
$\text{SiC-TiO}_2$	Mezcla	Luz solar natural	8	69	[34]
$\text{SiC-TiO}_2$	Recubrimiento	Simulador solar	8	83	--
$\text{SiC-TiO}_2$	Recubrimiento	Luz natural	8	60	--
$\text{SiC-TiO}_2$	Recubrimiento	UV	8	40	--

---

Finalmente se concluye que bajo condiciones de luz solar simulada, luz natural y/o luz UV, los morteros con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub> son capaces de eliminar contaminantes orgánicos en solución acuosa, con los cuales los morteros pueden estar en contacto por estar expuestos a la intemperie. La actividad fotocatalítica mostrada por los morteros con fotocatalizador depositado en forma de película se debe a que la presencia del fotocatalizador en la superficie del mortero causa una mayor exposición de sitios activos, los cuales son necesarios para llevar a cabo la reacción fotocatalítica. Esta afirmación se corrobora con lo reportado por Vulic et. al., [96] quienes mencionan que se obtuvo una mayor eficiencia en la degradación del colorante azul de metileno bajo luz UV, cuando se emplean morteros con acabado de recubrimiento, comparada con los resultados cuando el fotocatalizador es agregado a la matriz cementante en el proceso de mezclado.

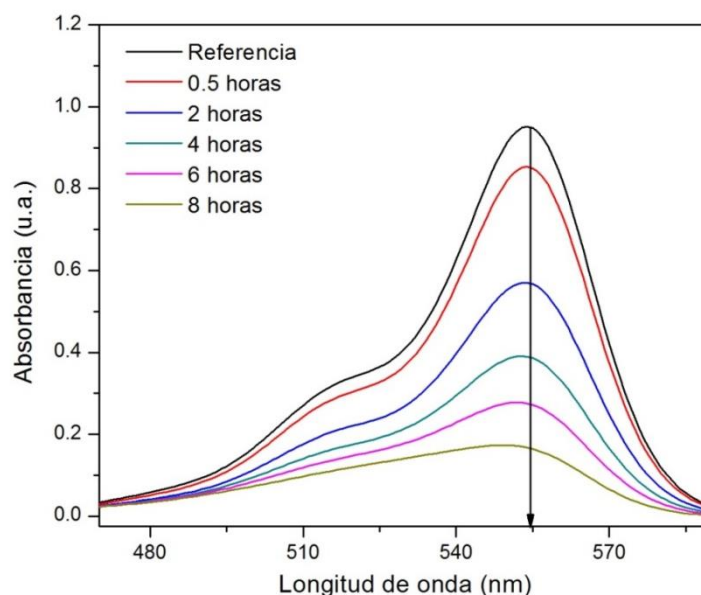
#### **3.6.4. Evolución de los espectros de absorción de la rodamina B durante la reacción fotocatalítica.**

Se estudió el comportamiento de la degradación del colorante rodamina B empleando los morteros de cemento gris y cemento blanco, en función del tiempo de irradiación. Para fines ilustrativos, sólo se presentan las muestras de mortero irradiada bajo luz solar simulada. ya que éstas son las muestras que presentaron mayor actividad fotocatalítica y en ellas se pueden observar dos comportamientos diferentes.



---

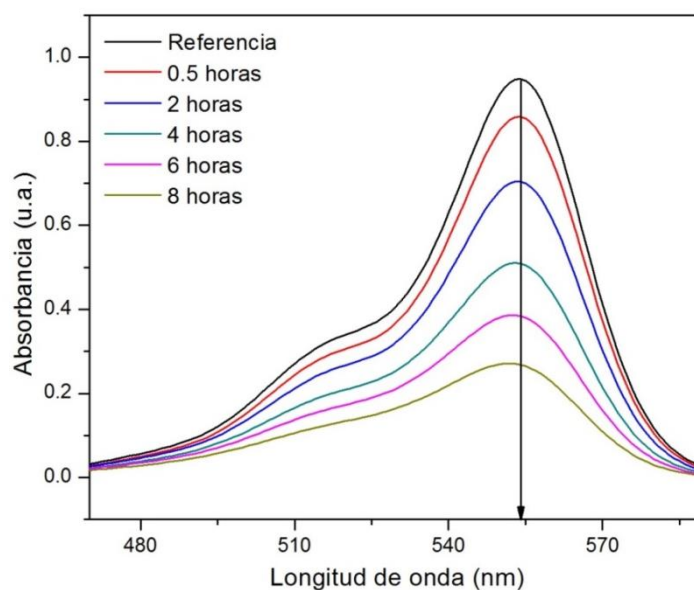
En la figura 43 se muestra el espectro de absorción del mortero gris, donde se puede apreciar una disminución considerable en el espectro después de 8 horas de irradiación. En el intervalo de longitudes de onda de 470-590 nm se puede observar un notorio desplazamiento hacia longitudes de onda más corta durante el proceso de irradiación. De acuerdo con la bibliografía consultada, una vez formados los radicales  $\bullet\text{OH}$  y  $\bullet\text{O}_2^-$ , el colorante rodamina B sigue un mecanismo de degradación denominado de-etilación, que involucra la formación de N-detilados; es decir la remoción de los grupos etilo de la molécula, permitiendo el cambio gradual de la coloración de la Rodamina B. Estos intermediarios se forman sucesivamente y su presencia se detecta por la aparición de las bandas de absorción a longitudes de onda específicas: rodamina B a 554 nm, N,N,N-trietilrodamina 539 nm, N,N dietilrodamina a 522 nm, N-etilrodamina a 510 nm y, finalmente, rodamina a 498 nm [97,98].



**Figura 43.** Espectro de absorción de la muestra de mortero gris irradiada bajo luz solar simulada.

---

Por otra parte, en la figura 44 se muestra el espectro de absorción de los morteros de cemento blanco. Se puede apreciar una disminución gradual de la longitud de máxima absorción de 554 nm, sin embargo no se observa un desplazamiento hacia longitudes de onda menores. Este proceso de degradación puede asociarse con el ataque directo de los anillos aromáticos, lo que provoca la ruptura de la molécula orgánica y, como consecuencia, la degradación de la misma; cabe destacar que en este tipo de proceso no ocurre desplazamiento de longitud de onda [99].



**Figura 44.** Espectro de absorción de la muestra de mortero blanco irradiada bajo luz solar simulada.

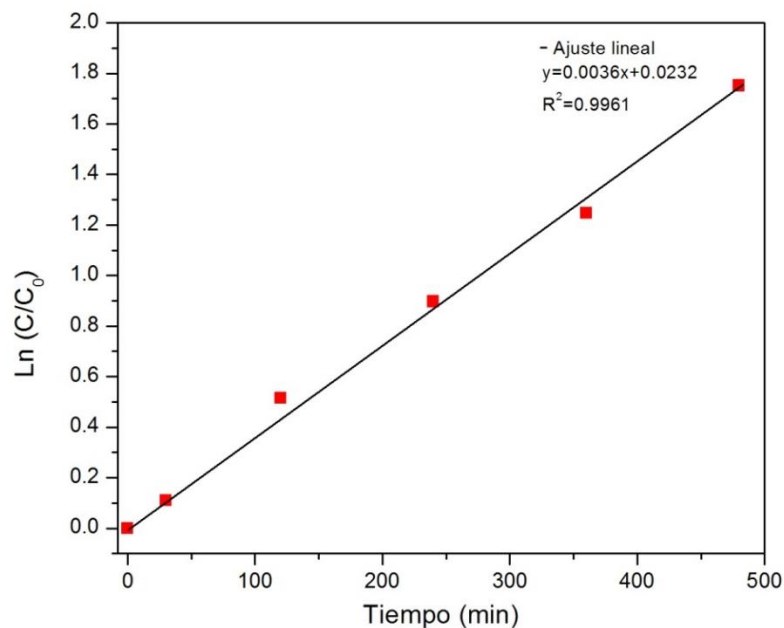
---

### 3.6.5. Parámetros cinéticos de las reacciones de degradación de rodamina B bajo irradiación de luz.

Una vez realizadas las pruebas fotocatalíticas, se determinó la cinética de la reacción con los datos experimentales obtenidos para las diferentes muestras. Por lo anterior se consideró que las reacciones siguen un modelo de primer orden, por lo que la constante de velocidad y el tiempo de vida media se determinaron empleando la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0}\right) = -kt \quad \text{ecuación 4}$$

Donde  $C/C_0$  es la concentración del colorante,  $k$  es la constante de velocidad y  $t$  el tiempo. En la figura 45 se muestra la curva del comportamiento cinético que sigue la reacción de degradación de Rodamina B, utilizando el mortero de cemento gris con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador. Se puede apreciar que el ajuste lineal de esta curva presenta una buena correlación, lo que corrobora que la reacción sigue un modelo de primer orden. En este caso, esta reacción presenta un tiempo de vida media de 192 min; es decir, al alcanzar este tiempo se logra una degradación del 50% de la concentración inicial de la rodamina, bajo luz solar simulada; mientras que su constante de velocidad fue de  $3.6 \times 10^{-3} \text{ K (min}^{-1}\text{)}$ .



**Figura 45.** Ajuste lineal del experimento muestra de mortero gris irradiado con simulador solar.

En la tabla 17 se muestran los parámetros cinéticos obtenidos para cada uno de los morteros gris y blanco con fotocatalizador, irradiados con los tres diferentes tipos de luz.

De acuerdo con los valores de tiempo de vida media y los valores de constante de velocidad obtenidos, se puede decir que la intensidad de la irradiación tiene una gran influencia en la velocidad de esta reacción. En este caso, la luz solar simulada muestra mayor degradación que la luz solar natural y ésta a su vez presenta mayor degradación que la obtenida al irradiar con luz UV. Es decir, se observa que la reacción se lleva a cabo de manera más rápida cuando se emplea el simulador solar como fuente de irradiación. Además, se puede apreciar que, independientemente del tipo de radiación empleada, las muestras de mortero gris presentan mayor actividad fotocatalítica que las

---

muestras de mortero blanco. Lo anterior lleva a suponer que las características físicas del tipo de mortero tienen también cierto grado de influencia en la actividad fotocatalítica, como es el índice de reflectividad solar (SRI). Este parámetro puede definirse como la capacidad de un material para reflejar la radiación solar incidente. Si se cuenta con una alta reflectividad, se tendrá por lo tanto una menor absorción de la radiación solar. De igual manera el SRI cuantifica el calor que puede acumular un material en relación con una superficie patrón (blanca y negra), en condiciones ambientales normales. Es conocido que los materiales que presentan una coloración blanca tienen un índice de reflectividad del 100%, mientras que las muestras de color negro absorben totalmente la energía, por lo que su índice de reflectividad solar es 0% [100]. Por ello, en este caso la muestra de cemento gris presentó mayor actividad, ya que al absorber una mayor cantidad de energía y tener menor índice de reflectividad, provocó una menor recombinación del par hueco-electrón generado por la intensidad de luz, como ocurrió en este caso con el empleo del simulador solar.

**Tabla 16.** Parámetros cinéticos de los datos experimentales de morteros gris y blanco con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub>.

<b>Muestra</b>	<b>Tipo de irradiación</b>	<b>Cte. de Velocidad Aparente <math>k</math> (min<sup>-1</sup>)</b>	<b>Tiempo de vida media <math>t_{1/2}</math> (min)</b>
Mortero Gris SiC-TiO <sub>2</sub>	Lámpara UV	$9.0 \times 10^{-4}$	770
	Luz solar	$1.9 \times 10^{-3}$	364
	Simulador solar	$3.6 \times 10^{-3}$	192
Mortero Blanco SiC-TiO <sub>2</sub>	Lámpara UV	$8.0 \times 10^{-4}$	866
	Luz solar	$1.7 \times 10^{-3}$	407
	Simulador solar	$2.6 \times 10^{-3}$	266

De acuerdo con los resultados anteriormente expuestos, los factores que influyeron en la actividad fotocatalítica de los materiales estudiados fueron principalmente el área superficial específica, la adsorción del colorante en la superficie, la capacidad de absorción de luz, la porosidad y la naturaleza de la radiación empleada.

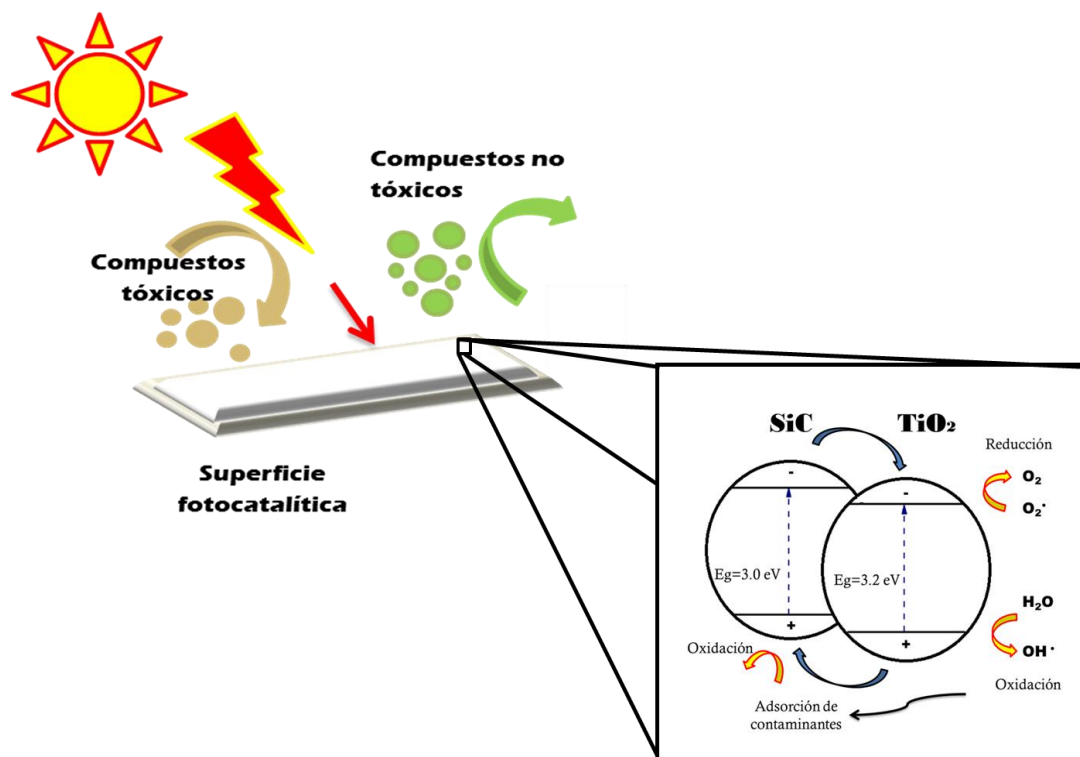
### **3.6.6. Mecanismo de degradación fotocatalítica de los morteros gris y blanco con recubrimiento SiC-TiO<sub>2</sub> sobre la rodamina B.**

Los resultados obtenidos mostraron que la combinación de dos semiconductores como fotocatalizadores potencializó la eficiencia de la reacción de degradación de Rodamina B. En este caso, el recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> sobre las muestras de mortero favoreció la absorción de luz solar y,

---

debido a la presencia de un mayor número de sitios activos, se generó una gran cantidad de pares hueco-electrón y la disminuyó la velocidad de recombinación.

En la figura 46 se muestra el esquema del mecanismo de degradación fotocatalítica empleando morteros con recubrimientos de SiC-TiO<sub>2</sub>. Particularmente, el empleo de cemento gris en la elaboración de morteros favoreció la absorción de luz, mientras que el uso del cemento blanco no favoreció la absorción de la luz, debido a que se reflejó una gran parte de la radiación. No obstante, en ambos casos se demostró la efectividad de los materiales cementantes fotocatalíticos para eliminar las sustancias contaminantes que ensucian sus superficies. De esta manera, el mecanismo bajo el cual ocurrió la reacción de degradación fotocatalítica de la Rodamina B empleando los morteros recubiertos con fotocatalizador fue el siguiente: Primeramente, al ser irradiados los semiconductores, los electrones de la banda de valencia del TiO<sub>2</sub> pasan a la banda de valencia del SiC, generando al mismo tiempo una transición de electrones de la banda de conducción del SiC hacia la banda de conducción del TiO<sub>2</sub>, así como una transferencia de huecos del TiO<sub>2</sub> al SiC. Esto propicia la prolongación de la separación de cargas y evita la recombinación, dejando libres los huecos y favoreciendo la formación de los radicales •OH, lo que facilita el proceso fotocatalítico [101]. Es importante mencionar que la combinación de semiconductores con valores de ancho de banda diferentes, es una de las estrategias más comunes para mejorar los procesos fotocatalíticos [102].



**Figura 46.** Diagrama esquemático de la representación del mecanismo de fotocatalisis utilizando morteros gris y blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador.

En este caso, toda la luz solar recibida se utiliza por el TiO<sub>2</sub> para generar pares hueco-electrón, que rápidamente buscarán interactuar con las moléculas orgánicas presentes en el medio acuoso, para provocar su oxidación. Sin embargo, una parte de los electrones foto-generados migrará hacia el SiC y se provocará una sinergia en la que ambos semiconductores causarán la degradación del colorante de manera complementaria y más efectiva.



---

### **3.7. Desempeño fotocatalítico de la reducción $\text{CO}_2$ de las muestras de mortero gris y mortero blanco con recubrimiento de $\text{SiC-TiO}_2$ .**

Debido a los resultados satisfactorios que se obtuvieron de la reacción de degradación de Rodamina B utilizando los morteros de cemento gris y blanco con recubrimiento de  $\text{SiC-TiO}_2$ , se procedió a utilizar estos materiales en otro tipo de reacción fotocatalítica, como es la reducción de  $\text{CO}_2$ . Éste es uno de los gases provenientes de la combustión de compuestos fósiles y al igual que los  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y los COV's (compuestos orgánicos volátiles), requiere ser eliminado y/o aprovechado en beneficio de la purificación del medio ambiente.

Particularmente, la reducción de  $\text{CO}_2$  ha cobrado gran interés debido a la factibilidad de llevar a cabo la transformación del  $\text{CO}_2$  en alcoholes ligeros (metanol y etanol), así como gas metano y/o ácido fórmico. Todos ellos con gran potencial para ser considerados como combustibles alternos por su potencia energética y su menor incidencia contaminante.

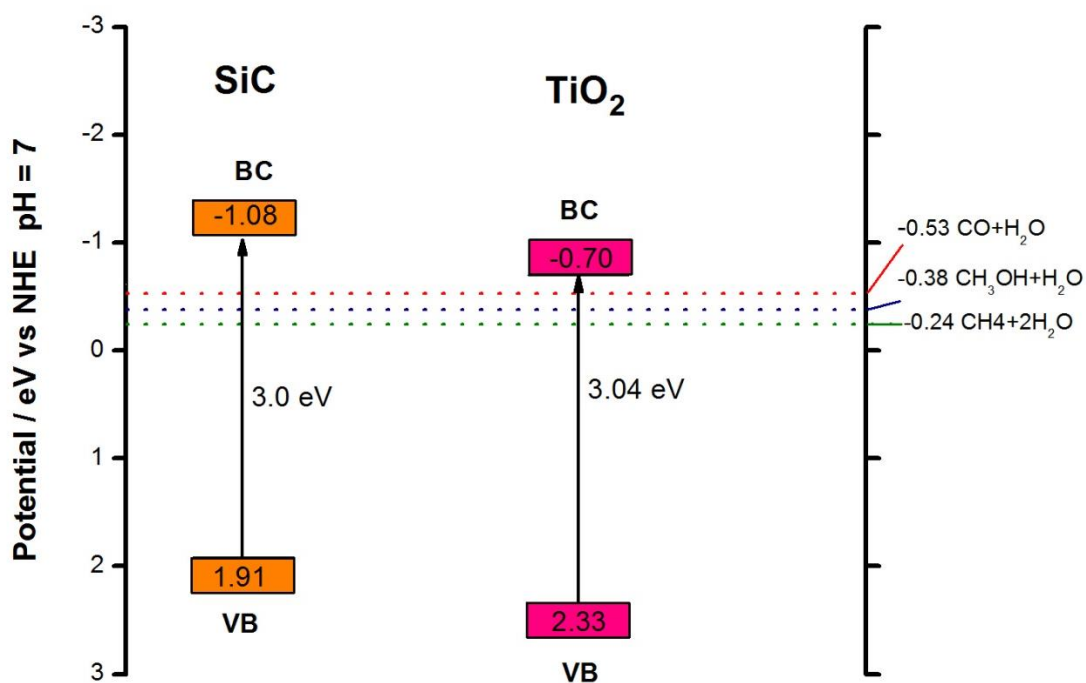
En este caso, se buscó la obtención de metanol a través de la prueba de fotocatálisis, empleando una solución acuosa saturada de  $\text{CO}_2$  y como fotocatalizador los morteros con recubrimiento de  $\text{SiC-TiO}_2$ , bajo irradiación de luz UV. Así mismo, se llevó a cabo la prueba para la reducción de  $\text{CO}_2$ , en fase gas, con la finalidad de obtener metano.

La realización de las pruebas anteriormente mencionadas fue posible, ya que de acuerdo con la estructura de bandas mostrada previamente en la figura 34, los valores de las bandas de conducción de los fotocatalizadores empleados

---

son más negativas en comparación con el potencial de reducción de  $\text{CO}_2$ , lo que significa que estos fotocatalizadores generarán huecos capaces de oxidar el agua a  $\text{OH}^\bullet$  y producir protones  $\text{H}^+$ , ya que su banda de valencia es más positiva que el nivel de oxidación del agua [62]. Estos protones reaccionarán con el  $\text{CO}_2$ , provocando su reducción a metanol y/o a gas metano, según el medio empleado.

Muchos semiconductores han sido empleados para llevar a cabo la reducción del  $\text{CO}_2$ ; sin embargo, en la mayoría de los casos no satisfacen el requisito de provocar la reducción del  $\text{CO}_2$ , al no contar con el potencial lo suficientemente negativo para que se lleven a cabo las reacciones esperadas. En la figura 47 se muestran los potenciales de óxido-reducción de los fotocatalizadores  $\text{SiC}$  y  $\text{TiO}_2$ , que fueron determinados mediante espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS). También en esta figura se muestran los potenciales de reducción de las reacciones de transformación del  $\text{CO}_2$  más comunes.



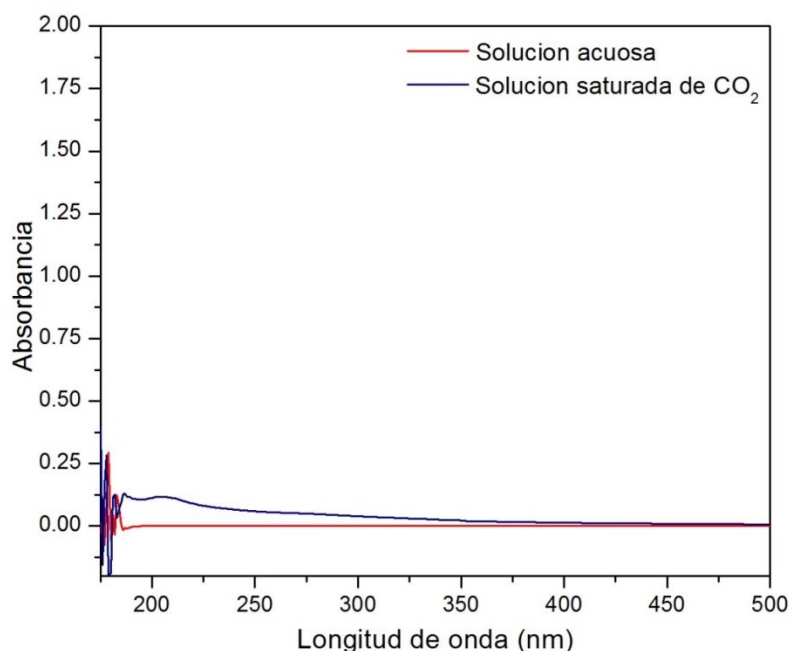
**Figura 47.** Alineación de la energía de banda del SiC y del TiO<sub>2</sub> y los diferentes potenciales de reducción de CO<sub>2</sub>

De acuerdo con lo observado en la figura anterior, se corrobora que ambos semiconductores son factibles de ser empleados en la reacción fotocatalítica de reducción de CO<sub>2</sub>. Por ello se procedió a evaluar la actividad fotocatalítica de los morteros gris y blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> para esta reacción.

---

### 3.7.1. Producción de metanol en solución acuosa.

Primeramente se llevó a cabo la prueba de fotólisis poniendo bajo irradiación de luz UV la solución saturada de  $\text{CO}_2$  y sin agregar fotocatalizador. Esta prueba mostró que, aún después de 6 horas de irradiación, no se presentó ningún cambio significativo en la curva de absorción obtenida por UV-Vis, ver figura 48.

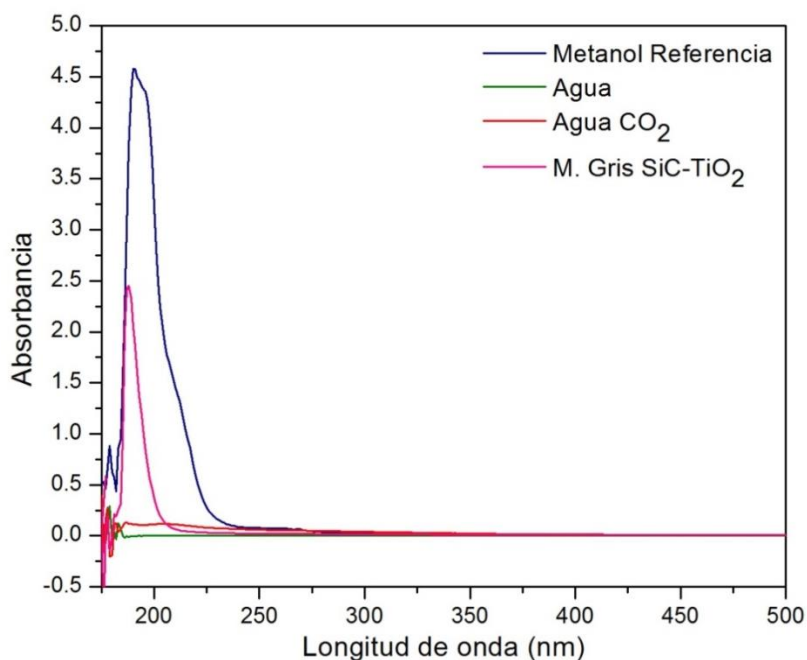


**Figura 48.** Prueba de fotólisis de la reacción de reducción de  $\text{CO}_2$

Por otra parte, al llevar a cabo la reacción de reducción de  $\text{CO}_2$ , en presencia del mortero gris con  $\text{SiC-TiO}_2$  como fotocatalizador, se observó en la curva de la figura 49 una banda de absorción a una longitud de onda menor que 190 nm, la que fue asociada con la presencia del metanol. Para corroborar lo

---

anterior, se llevó a cabo el análisis de una muestra de metanol concentrado empleado como referencia y una muestra de agua destilada. En el espectro de absorción de UV-Vis obtenido se puede apreciar claramente que la banda de absorción del mortero con fotocatalizador coincide con la banda del metanol de referencia, tal y como lo reportan Abidov et. al., [68] por lo que se puede asumir que es probable que como producto de la reducción de  $\text{CO}_2$ , se esté obteniendo metanol; sin embargo no se descarta tampoco que se pueda estar presentando otro tipo de productos orgánicos.

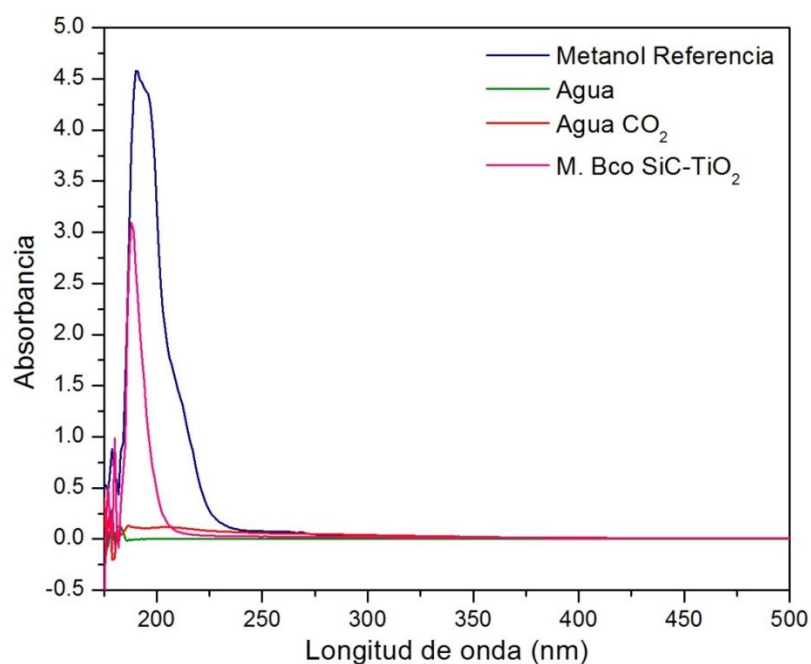


**Figura 49.** Espectro de absorción de UV-Vis de metanol de mortero de cemento gris.

De igual manera, se llevó a cabo la reacción de reducción de  $\text{CO}_2$  empleando las muestras de mortero blanco, con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub>. Ver figura 50. En este caso, nuevamente se observó la presencia de la banda de

---

absorción del metanol, tal y como se observó en la figura anterior. Aunque es poca la variación, se determinó que la muestra de mortero blanco presenta mayor actividad fotocatalítica de reducción de  $\text{CO}_2$  que la muestra de morteros gris. Esto podría estar relacionado con la porosidad que presentan estos materiales, pues al tener una mayor porosidad en el caso del mortero gris, es probable que el  $\text{CO}_2$  se absorba en los poros limitando la reacción de reducción. Mientras que en el caso del mortero de cemento blanco la porosidad es menor, permitiendo que una mayor cantidad de  $\text{CO}_2$  interactúe con la superficie del fotocatalizador, provocando una mayor reducción.

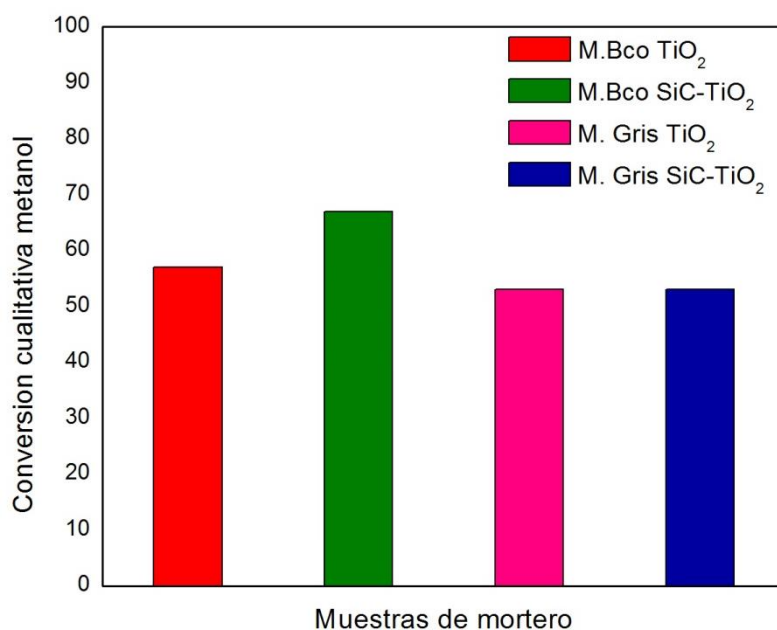


**Figura 50.** Espectro de absorción de UV-Vis de metanol de mortero de cemento blanco.

En la figura 51 se muestran los porcentajes de conversión de  $\text{CO}_2$  a metanol, que se calcularon empleando una curva de calibración elaborada con

---

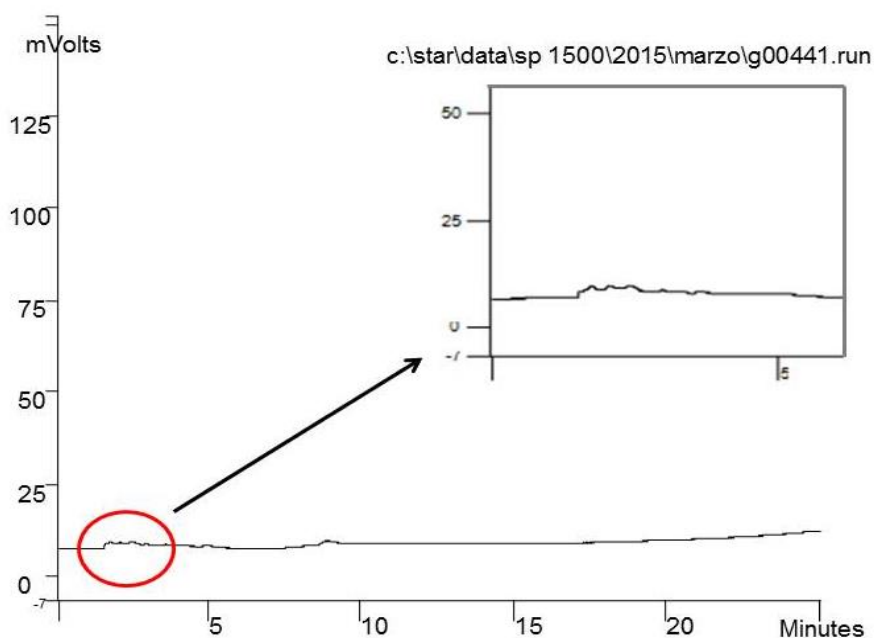
metanol en solución acuosa a diferentes concentraciones, la cual se muestra en el anexo 1. A partir de esta curva se obtuvo la relación entre la máxima absorbancia del metanol empleado como referencia y los valores de absorbancia obtenidos al utilizar los morteros gris y blanco con fotocatalizador  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiC-TiO}_2$ . Aunque se puede observar que en todos los casos se logró un porcentaje de conversión mayor que el 50%, es el mortero blanco con  $\text{SiC-TiO}_2$  quien presentó el mayor porcentaje de conversión de todos ellos, alcanzando aproximadamente un 80% de conversión, después de 6 horas de reacción bajo luz UV.



**Figura 51.** Porcentajes de conversión de  $\text{CO}_2$  a metanol calculada, a partir de la curva de calibración.

---

Con la finalidad de evidenciar la presencia del metanol, se llevó a cabo el análisis por cromatografía de gases, encontrando que, efectivamente, se está presentando la presencia del metanol como producto de la reacción de reducción de  $\text{CO}_2$ ; sin embargo, al parecer, la cantidad producida es muy pequeña, por lo que no pudo ser cuantificada. En la figura 52 se puede apreciar claramente el pico en el cromatograma correspondiente al metanol, en comparación con la muestra de referencia.



**Figura 52.** Cromatograma de mortero de cemento blanco empleado en la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ .

Por otro lado con la finalidad de mejorar la selectividad y la eficiencia del proceso de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ , se llevó a cabo la variación de los



---

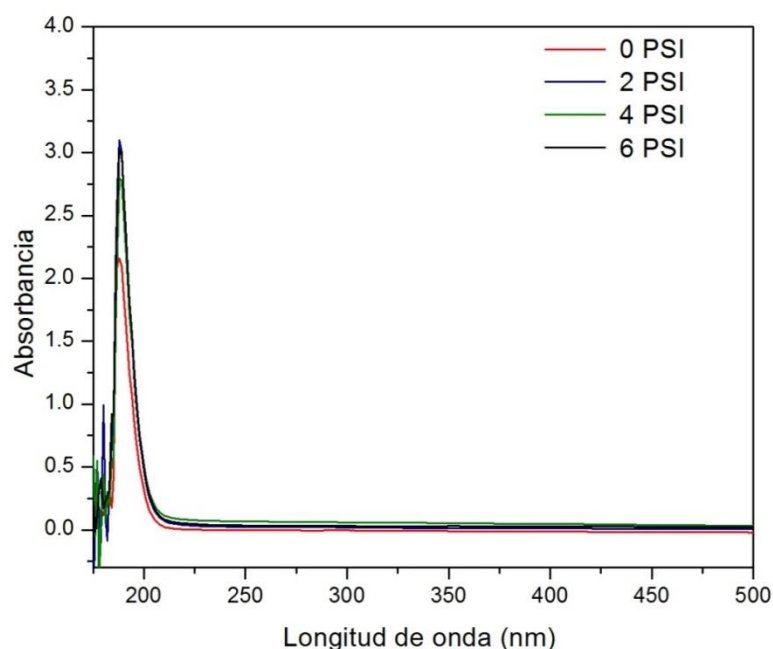
parámetros más importantes que comúnmente afectan a las reacciones químicas, como son: la presión, la temperatura y el pH.

### **3.7.2. Efecto de la presión.**

Puesto que cuando se realizó la reacción de reducción de CO<sub>2</sub> utilizando una solución saturada, la conversión fue mínima, se decidió incrementar gradualmente la presión del reactor, hasta alcanzar los 6 PSI, saturando la solución con CO<sub>2</sub>. En la figura 53 se puede apreciar cómo, a medida que incrementa la presión a 2 PSI, se aumenta la banda de absorción; por lo que se asumió que se estaba obteniendo una mayor concentración de metanol; sin embargo, al seguir aumentando la presión, la banda de absorción comenzó a disminuir nuevamente, pero seguía siendo mayor que la prueba inicial. Es decir, que al aumentar la presión en todas las muestras se tiene una mayor eficiencia de fotorreducción que cuando el sistema opera a presión del ambiente, lo cual indica que la presión juega un papel muy importante en la mejora del rendimiento fotocatalítico de esta reacción. Un efecto similar se observó por Usubharatana et. al., [103] quienes encontraron que, al variar la presión, la temperatura y la intensidad de la luz se incrementaba la transformación de CO<sub>2</sub> mejorando el rendimiento del sistema fotocatalítico. Así mismo, con la variación de la presión en el sistema fotocatalítico, se mejoró también la selectividad de la reacción de reducción de CO<sub>2</sub>, debido a que al aumentar la presión se aumentó la concentración de CO<sub>2</sub> en el medio acuoso.

---

Además, es importante mencionar que el incremento de la presión de  $\text{CO}_2$  en el sistema influyó positivamente en la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en solución acuosa, tal y como se ha reportado previamente [104]. Por lo que, al haber una mayor concentración de  $\text{CO}_2$ , se obtendrá mayor conversión fotocatalítica hasta alcanzar un límite. En nuestro caso, se puede apreciar que la máxima conversión se obtuvo cuando el sistema alcanzó una presión de 2 PSI y a medida que se incrementó la presión, el porcentaje de conversión comenzó a disminuir. Este comportamiento es muy similar al observado por Tseng et. al., [59] en el cual se tiene mayor rendimiento de conversión de metanol cuando se trabaja con 125 KPa, sin embargo, el rendimiento disminuye conforme se sigue aumentando la presión.



**Figura 53.** Efecto de la presión en la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  de morteros de cemento blanco.

---

### 3.7.3. Efecto del pH.

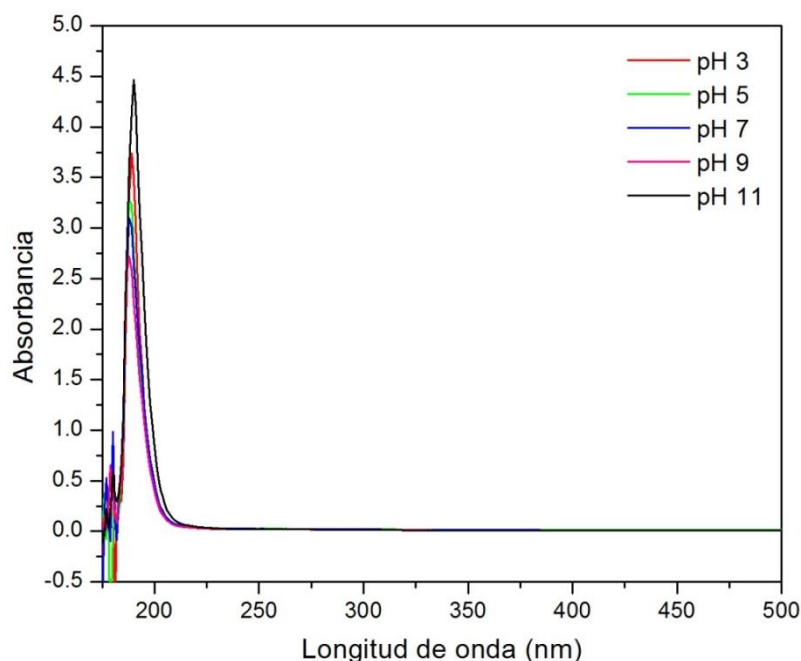
Dado que el pH es uno de los factores que más influye en los procesos fotocatalíticos, en este trabajo se llevó a cabo la prueba de reducción de  $\text{CO}_2$  a diferentes condiciones de pH, en medio ácido (pH 3 y 5), neutro (pH 7) y básico (pH 9 y 11), y utilizando los morteros recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador.

En la figura 54 se muestran las curvas de absorbancia de los sistemas fotocatalíticos estudiados a diferente pH. De acuerdo con lo observado en esta figura, se puede decir que bajo condiciones drásticas de pH (3 y 11), se observa un incremento en la absorbancia en comparación con la muestra analizada a pH 7; mientras que en condiciones moderadas de pH (5 y 9), la absorbancia no sufre una variación significativa. Esta situación lleva a concluir que la mayor conversión de  $\text{CO}_2$  a metanol se obtiene al trabajar los sistemas fotocatalíticos bajo condiciones altamente ácidas y altamente básicas. En este caso, la mayor absorbancia obtenida fue para el sistema fotocatalítico a pH 11. Este resultado concuerda con el trabajo reportado por Abidov et. al., [68], que encontraron que la conversión de  $\text{CO}_2$  a metanol se ve favorecida al variar el pH, tanto en un medio ácido como en un medio básico, obteniendo la mayor conversión a pH 11.

Lo anterior se debe a que, al variar el pH, la superficie del fotocatalizador se carga positiva o negativamente, según su naturaleza, produciendo una fuerte adsorción de la especie a reducir; en este caso, el  $\text{CO}_2$  [105].

---

Por otra parte, la baja solubilidad del  $\text{CO}_2$  en condiciones neutras requiere el uso de soluciones alcalinas [106], ya que en ellas se puede disolver más fácilmente que en agua pura o en una solución ácida [107].

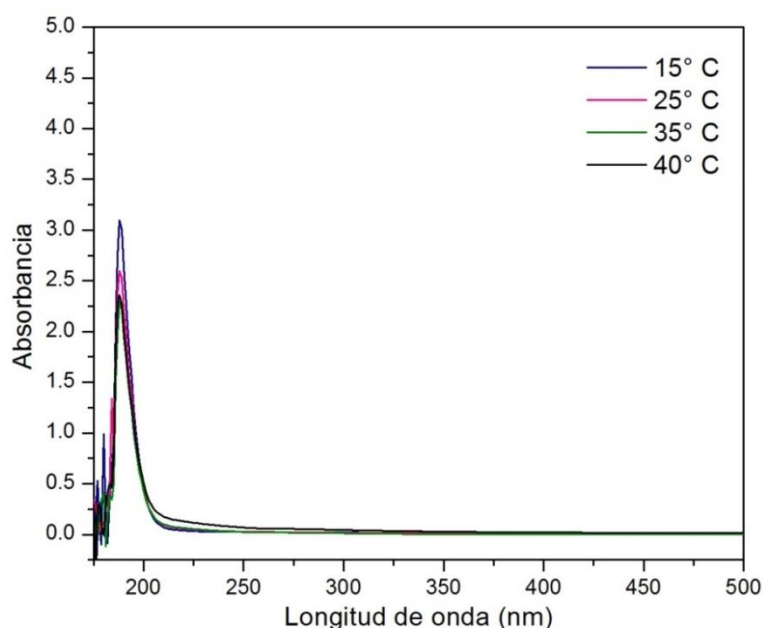


**Figura 54.** Efecto del pH en la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  de morteros de cemento blanco.

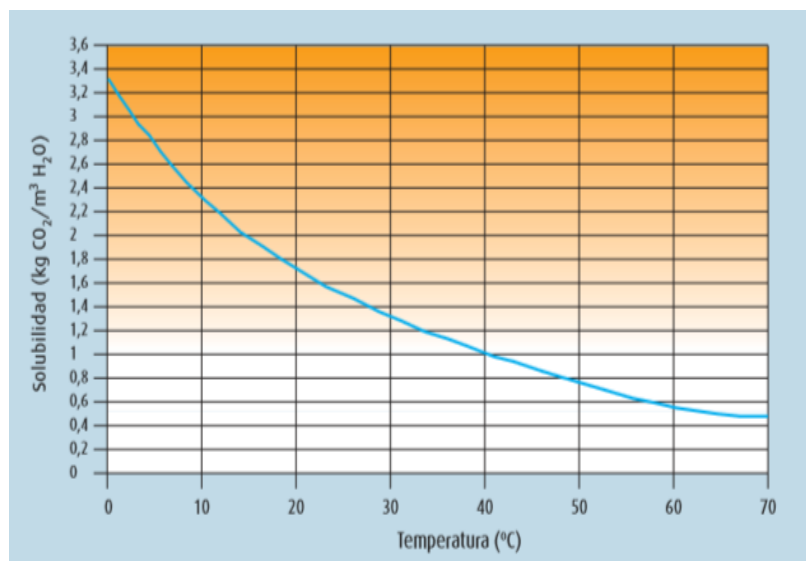
En este caso, al utilizar un pH alcalino se tiene una mayor concentración de iones  $\text{OH}^-$  los que actúan como trampa de huecos y reducen la recombinación del par hueco-electrón, favoreciendo las reacciones de reducción de  $\text{CO}_2$  [59][108]. De esta manera se puede suponer que la conversión de  $\text{CO}_2$  a metanol es consecuencia de la solubilidad que se presenta a pH alcalino, pero también se debe tomar en cuenta la temperatura a la que se llevó a cabo la reacción que, en este caso, fue de  $15^\circ\text{C}$ . Lo anterior lleva a concluir que a esta temperatura se tiene una mayor solubilidad del  $\text{CO}_2$ , en comparación con la

---

solubilidad reportada a 25°C (1.45 g/L) [68]. En la figura 55 se muestran las curvas de absorción de la reacción de reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>, de morteros de cemento blanco, a diferentes temperaturas, entre 15 y 40°C. Se puede apreciar que a medida que la temperatura disminuye se presenta un incremento gradual en la banda del metanol. El intervalo de temperaturas empleado fue seleccionado con base en el diagrama de solubilidad de CO<sub>2</sub> en agua. Ver la figura 56.



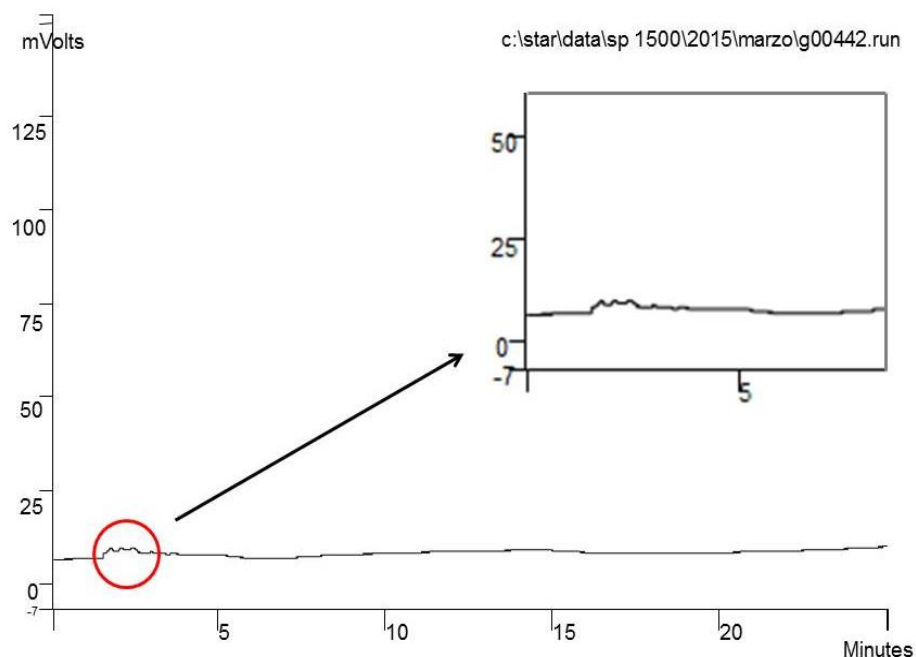
**Figura 55.** Efecto de la temperatura en la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.



**Figura 56.** Diagrama de solubilidad de CO<sub>2</sub> en agua a diferentes temperaturas

#### 3.7.4. Evidencia de la presencia de metanol por cromatografía de gases.

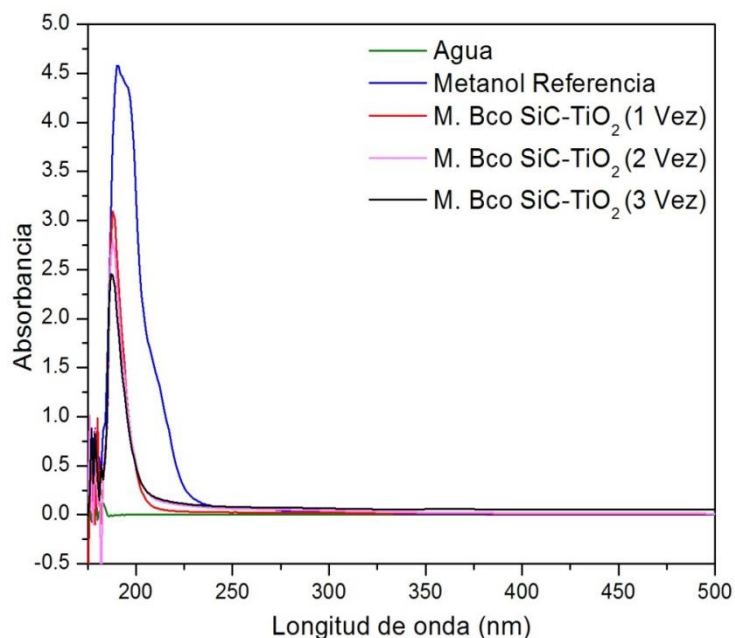
La presencia de metanol, como producto de las pruebas de reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> de los morteros de cemento blanco recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub>, fue detectada mediante la técnica de cromatografía de gases. En este caso, la muestra analizada fue la obtenida utilizando las mejores condiciones de presión, temperatura y pH. En la figura 57, se puede observar que el pico correspondiente al metanol aparece a un tiempo de retención menor que 5 minutos, sin embargo, debido a que no está muy definido, no fue posible su cuantificación, por lo que solamente fue posible su determinación cualitativa.



**Figura 57.** Cromatograma de mortero de cemento blanco empleado en la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> variación presión, pH y temperatura.

### 3.7.5. Pruebas de reproducibilidad.

Con la finalidad de determinar si la reacción de reducción de CO<sub>2</sub> podría ser reproducible, las muestras de los morteros de cemento blanco con recubrimiento de SiC-TiO<sub>2</sub> fueron sometidas a 3 ciclos continuos de reacción. Ver la figura 58. Después de estos ciclos, se observó que solamente se tuvo una pequeña variación en las curvas de absorbancia de las pruebas de reducción de CO<sub>2</sub>, por lo que se puede concluir que el sistema de reacción es reproducible, sin presentar una pérdida significativa en su actividad fotocatalítica.



**Figura 58.** Pruebas de reproducibilidad de reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> de morteros de cemento blanco.

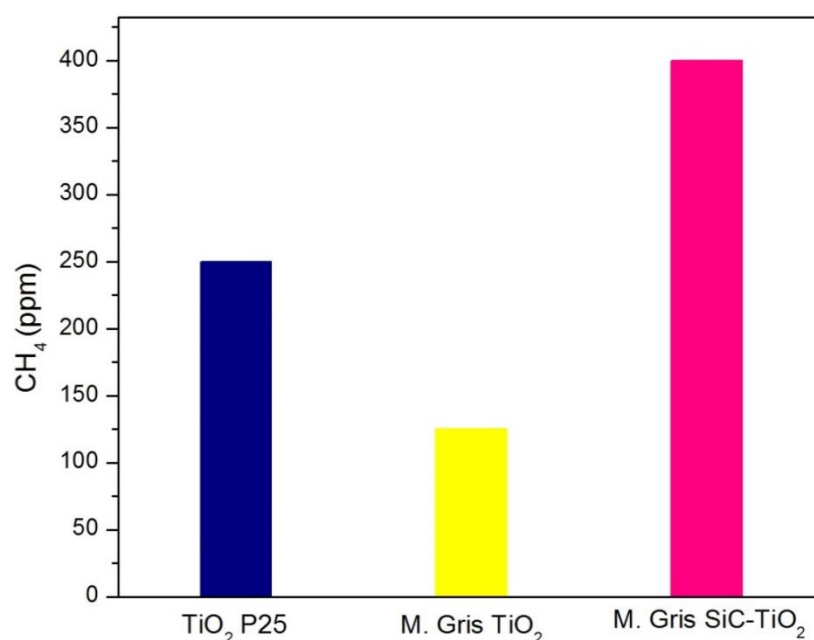
### 3.7.6. Producción de metano en fase gas.

Con base en los resultados obtenidos sobre la producción de metanol, a partir de la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> en un sistema acuosa y empleando los morteros recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub>, se procedió a llevar a cabo la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub> en fase gas, para la obtención de metano. Como se puede apreciar en la figura 59, se observan los resultados de la conversión de CO<sub>2</sub> a metano (CH<sub>4</sub>), al utilizar el TiO<sub>2</sub> comercial Degussa P25, y los morteros con TiO<sub>2</sub> y SiC-TiO<sub>2</sub>, como fotocatalizadores. De acuerdo con lo observado en esta figura, la muestra con recubrimiento de TiO<sub>2</sub> no logró superar la actividad del TiO<sub>2</sub> comercial Degussa P25; sin embargo, cuando se emplea el mortero con



---

SiC-TiO<sub>2</sub> se tiene una conversión mayor, alcanzando aproximadamente 400 ppm de CH<sub>4</sub>, después de 14 horas de reacción bajo radiación de luz UV. Con este resultado se puede concluir que los morteros desarrollados en este trabajo e impregnados con SiC-TiO<sub>2</sub> como fotocatalizador son capaces de llevar a cabo la reducción de CO<sub>2</sub>, tanto en fase acuosa como en fase gas, produciendo metanol y/o metano según sea el caso; ambos productos considerados como combustibles energéticos.



**Figura 59.** Reducción de CO<sub>2</sub> a metano en fase gas.

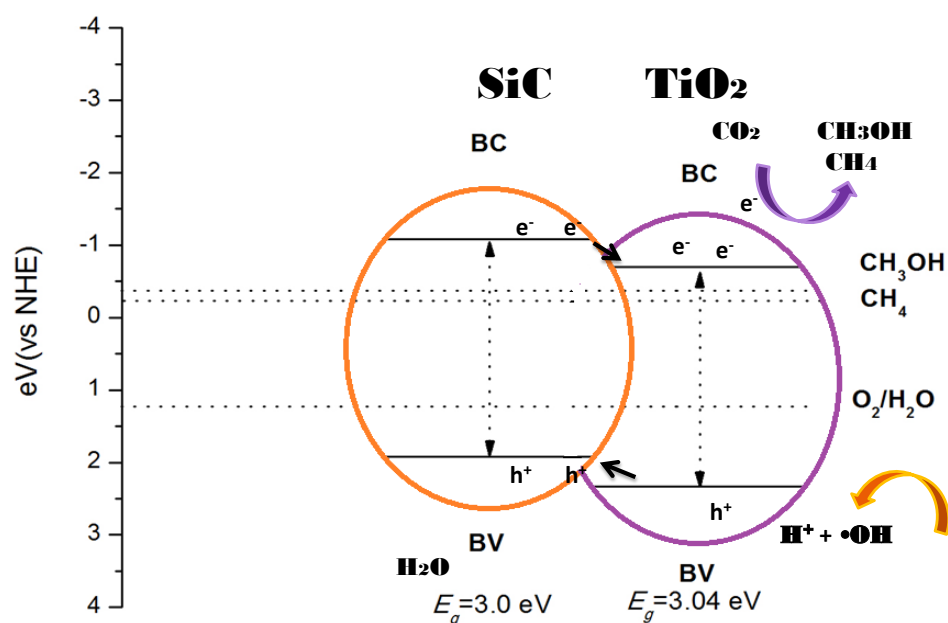
### 3.7.8. Mecanismo de la reducción fotocatalítica de CO<sub>2</sub>.

La reducción fotocatalítica del CO<sub>2</sub> se llevó a cabo bajo irradiación de luz UV, donde el mortero con fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> impregnado mostró una actividad

---

fotocatalítica considerable produciendo metanol y metano como sub-producto de la reacción en función del medio empleado.

De acuerdo con los resultados obtenidos y discutidos en secciones anteriores, podemos proponer un posible mecanismo de la reacción de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ , el cual puede explicarse mediante el diagrama de la teoría de las bandas. Es importante hacer notar que esta teoría se basa en la posición relativa de la banda de valencia, la banda de conducción y los potenciales de óxido-reducción. En este caso, los potenciales de banda de conducción obtenidos mediante las pruebas de impedancia electroquímica para el SiC y el  $\text{TiO}_2$  son de  $-1.08 E^0$  (V) y  $-0.70$  vs.NHE a pH 7, los cuales son mucho más negativos que los potenciales de reducción requeridos para los sub-productos metanol y metano obtenidos en este trabajo y cuyos potenciales son de  $-0.38$  y  $-0.24 E^0$  (V) vs.NHE a pH 7 respectivamente, tal y como se observa en la figura 60, donde se describe el mecanismo propuesto para esta reacción fotocatalítica.



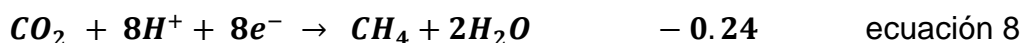
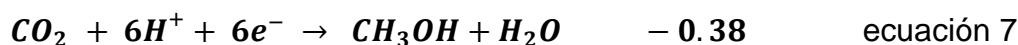
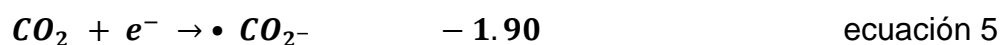
**Figura 60.** Mecanismo de reducción fotocatalítica del  $\text{CO}_2$

En este caso, el mecanismo de reacción en la foto-reducción de  $\text{CO}_2$  implica la formación de dos especies intermedias importantes, el radical hidrógeno ( $\bullet\text{H}$ ) y el anión dióxido de carbono ( $\bullet\text{CO}_2^-$ ) producidas por transferencia de electrones desde la banda de conducción. Este fenómeno, ha sido explicado previamente por Tahir et. al., [109], donde reportaron que la iluminación de los semiconductores provoca la foto-generación de huecos ( $h^+$ ) en la banda de valencia y electrones ( $e^-$ ) en la banda de conducción. Estos electrones foto-generados pueden consumirse efectivamente si el potencial de reducción de la reacción es menor que el potencial de la banda de valencia de los semiconductores empleados. En este caso el  $\text{TiO}_2$  tiene un borde de banda de conducción más positivo que el SiC, por lo cual se puede llevar a cabo la rápida

---

transferencia de los electrones foto-generados de la banda de conducción del SiC a la banda de conducción del TiO<sub>2</sub>.

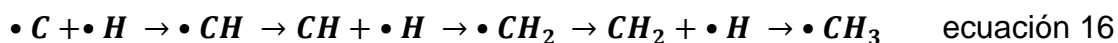
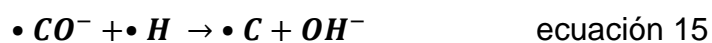
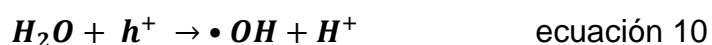
Así mismo, la fotorreduccion del CO<sub>2</sub> permite la obtención de subproductos tales como monóxido de carbono, metanol y metano principalmente. Siendo el primero (CO), un importante intermediario para la formación de los subproductos mencionados (metanol y metano). A continuación se describen las reacciones involucradas durante el proceso de reducción de CO<sub>2</sub>.



En este caso, en base a los resultados obtenidos en este trabajo podemos proponer que el mecanismo de reducción de CO<sub>2</sub> empleando los morteros recubiertos con SiC-TiO<sub>2</sub> fue similar al reportado por Ahmad et. al., [110] donde: Primeramente los huecos (h<sup>+</sup>) reaccionaron con las moléculas de agua adsorbidas sobre su superficie para producir los radicales hidroxilo (•OH) y los iones hidrógeno (H<sup>+</sup>). Después los H<sup>+</sup> reaccionaron con un electrón (e<sup>-</sup>) para formar el radical hidrógeno (•H). Ese radical es considerado la especie más activa para reaccionar con el radical anión dióxido de carbono (•CO<sub>2</sub><sup>-</sup>). Posteriormente la reacción del anión dióxido de carbono (•CO<sub>2</sub><sup>-</sup>) y el radical hidrógeno (•H) permitió la formación de monóxido de carbono (CO) y el ión

---

hidroxilo ( $\text{OH}^\cdot$ ). Este CO participa como un intermediario para la formación del ion carbón ( $\text{C}^\cdot$ ) el cual es una especie requerida en la formación de metano o metanol. Los radicales  $\text{H}^\cdot$  originados por la reducción de un protón reaccionaron con otro radical carbón  $\text{C}^\cdot$  en la superficie del catalizador para formar los intermediarios  $\text{C}_2^\cdot$ ,  $\text{C}_3^\cdot$  y finalmente  $\text{CH}_4$  (metano), principalmente en fase gas. Del mismo modo este radical carbón  $\text{C}^\cdot$  puede reaccionar con los radicales hidroxilo  $\text{OH}^\cdot$  para la formación del  $\text{CH}_3\text{OH}$  (metanol), esto ocurre cuando se tiene un medio acuoso.



---

Por otra parte, se observó que los sub-producto obtenidos de la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  en fase acuosa y en fase gas fueron metanol y metano respectivamente. Sin embargo se obtuvo un mayor rendimiento cuando la reacción se llevó a cabo en fase gas, este resultado es similar a lo mencionado por Li. et. al., [111] en el cual afirma que el la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  es mucho mayor en fase gas con una proporción controlada de vapor de agua que la reacción llevada a cabo en fase acuosa. Esto puede asociarse a que en fase acuosa hay una mayor cantidad de iones hidrogeno ( $\text{H}^+$  y  $\bullet\text{OH}$ ), los cuales compiten con los electrones foto-generados para la producción del radical  $\bullet\text{H}$  por lo cual se tendrá una menor cantidad de electrones disponibles para poder reaccionar con el  $\text{CO}_2$  adsorbido sobre la superficie del catalizador, por lo cal la obtención de los sub-productos de la reacción se verá disminuido.

---

## CAPITULO 4. CONCLUSIONES

A partir de la discusión de resultados del presente trabajo, se puede concluir lo siguiente sobre la incorporación del fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> en forma de recubrimiento en morteros de cemento gris y cemento blanco:

1. Se encontró que es posible obtener materiales cementantes con propiedades de auto-limpieza, para llevar a cabo la degradación de rodamina B en solución acuosa y la reducción de CO<sub>2</sub> en fase gas, mediante la incorporación del fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> en forma de recubrimiento y utilizando diferentes tipos de irradiación, como son: luz UV, luz solar simulada y luz natural
2. Se encontró que al adicionarse el fotocatalizador SiC-TiO<sub>2</sub> en forma de recubrimiento en los morteros de cemento gris y blanco, se logró un 80% de decoloración de la rodamina B, después de 8 horas de irradiación con luz solar simulada, mientras que con luz solar natural solamente se alcanzó un 60% de decoloración.

- 
3. Se determinó que la actividad de los morteros recubiertos se debe a que éstos presentan una mayor área de exposición a la luz irradiada, a diferencia de los morteros donde el fotocatalizador ha sido agregado en el proceso de mezclado y, por lo tanto, su área de exposición a la luz es menor.
  4. En particular, se encontró que la actividad de los materiales cementantes con cemento gris fue mayor que la mostrada por los materiales con cemento blanco, esto debido principalmente a su índice de reflectividad. Es decir, los morteros de cemento gris absorben una mayor cantidad de energía y la reflejan en menor proporción que los morteros de cemento blanco, en una relación de 2:1 con respecto al índice de reflectividad de los patrones blanco y negro, lo que les permite aprovechar de manera más eficiente la luz irradiada.
  5. Las muestras de mortero gris y blanco irradiadas bajo luz solar simulada demostraron ser las que obtuvieron mayor degradación fotocatalítica de rodamina B, mostrando un tiempo de vida media menor que las muestras irradiadas con otra fuente de luz. Por lo que se comprueba que el tipo de irradiación tiene una gran influencia en la velocidad de reacción de degradación.



- 
6. Los materiales cementantes con fotocatalizador ( $\text{SiC-TiO}_2$ ) incorporado en forma de recubrimiento mostraron ser activos para llevar a cabo la reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$  en fase acuosa y en fase gas, bajo irradiación de luz UV. Esto debido a que el SiC presenta un potencial de reducción más negativo y el  $\text{TiO}_2$  un potencial de reducción más positivo, provocando una sinergia entre ambos materiales que favorece la reducción de  $\text{CO}_2$ , tanto en fase acuosa como en fase gas.
  7. Se encontró que los materiales cementantes de cemento blanco presentaron un ligero aumento en la actividad de reducción de  $\text{CO}_2$  en fase acuosa en comparación con los materiales cementantes de cemento gris.
  8. Se determinó, mediante las técnicas de espectroscopia de UV-Vis y cromatografía de gases, que el sub-producto obtenido de la reacción de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ , en fase acuosa es el metanol y que su presencia se vio favorecida por la presión y la temperatura, que influyeron en la solubilidad del  $\text{CO}_2$  en el medio acuoso.
  9. Se comprobó que las variaciones en el pH afectan significativamente la reacción de reducción fotocatalítica de  $\text{CO}_2$ . Se encontró que el uso de soluciones alcalinas permite tener una mayor conversión, debido a que en estas condiciones se aumenta la solubilidad del  $\text{CO}_2$ .
-

---

10. Se encontró que los materiales cementantes a base de cemento gris son capaces de producir gas metano a partir de la reacción fotocatalítica de reducción de  $\text{CO}_2$  en fase de gas, lo cual fue detectado mediante cromatografía de gases. Este resultado se atribuye, además de la presencia del fotocatalizador, también a la capacidad de absorción de  $\text{CO}_2$  en los morteros.

---

## REFERENCIAS

- [1] L. Agulló, "Jornada sobre hormigones especiales," p. 112, 2008.
- [2] K. Villa, F. Gordillo, and F. Zarate, "Photocatalytic efficiency of  $\text{TiO}_2$  Ag /  $\text{TiO}_2$  multilayer films grown by sol-gel technique," vol. 8, pp. 29–34, 2010.
- [3] Q. L. Yu, M. M. Ballari, and H. J. H. Brouwers, "Indoor air purification using heterogeneous photocatalytic oxidation. Part II: Kinetic study," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 99, no. 1–2, pp. 58–65, Aug. 2010.
- [4] J.-M. Herrmann, "Titania-based true heterogeneous photocatalysis," *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, vol. 19, no. 9, pp. 3655–65, Nov. 2012.
- [5] E. Quagliarini, F. Bondioli, G. B. Goffredo, C. Cordoni, and P. Munafò, "Self-cleaning and de-polluting stone surfaces:  $\text{TiO}_2$  nanoparticles for limestone," *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, pp. 51–57, Dec. 2012.
- [6] I. Juárez Ramirez, L. M. Torres-Martínez, A. Cruz López, L. L. Garza Tovar, y M. E. Meza de la Rosa. "Nanopartículas semiconductoras: una alternativa para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en agua residual y la generación de energía de manera sustentable," *Ciencia-UANL*, vol. XI, no. 4, pp. 411–422, 2008.
- [7] M. C. Cotto-maldonado, T. Campo, E. Elizalde, A. Gómez-Martínez, C. Morant, and F. Márquez, "Photocatalytic Degradation of Rhodamine-B Under UV-Visible Light Irradiation Using Different Nanostructured Catalysts," vol. 3, no. 3, pp. 178–202, 2013.
- [8] Á. Patricia, Á. López, and S. Chacón, "Hormigones proyectados con características autolimpiantes y descontaminantes para recubrimientos de túneles," vol. 9, pp. 1–13, 2012.
- [9] N. Bengtsson and M. Castellote, "Heterogeneous photocatalysis on construction materials: effect of catalyst properties on the efficiency for degrading  $\text{NO}_x$  and self cleaning," vol. 64, no. 314, 2014.
- [10] N. Daneshvar, D. Salari, and A. R. Khataee, "Photocatalytic degradation of azo dye acid red 14 in water: investigation of the effect of operational parameters," vol. 157, pp. 111–116, 2003.

- 
- [11] F. Arab and I. Conference, "First Arab International Conference and Exhibition on The Uses of White Cement Cairo, Egypt, 28-30 April 2008," no. April, pp. 28–30, 2008.
- [12] Y. Paz, "Application of  $\text{TiO}_2$  photocatalysis for air treatment: Patents' overview," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 99, no. 3–4, pp. 448–460, Sep. 2010.
- [13] M. M. Ballari, Q. L. Yu, and H. J. H. Brouwers, "Experimental study of the NO and  $\text{NO}_2$  degradation by photocatalytically active concrete," *Catal. Today*, vol. 161, no. 1, pp. 175–180, Mar. 2011.
- [14] G. Luca, G. Ctg, and I. Group, "Photocatalytic Cementitious Materials – Situation , Challenges and Perspectives," pp. 4–7.
- [15] T. Yuranova, V. Sarria, W. Jardim, J. Rengifo, C. Pulgarin, G. Trabesinger, and J. Kiwi, "Photocatalytic discoloration of organic compounds on outdoor building cement panels modified by photoactive coatings," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 188, no. 2–3, pp. 334–341, May 2007.
- [16] A. Martinez de la Cruz, S.A. Obregon Alfaro, K. H. Lozano Rodriguez "Fotocatálisis heterogénea como herramienta tecnológica para la purificación de aguas residuales," *Ciencia-UANL*, vol. XIII, no. 4, pp. 421–429, 2010.
- [17] Y. Ma, X. Wang, Y. Jia, X. Chen, H. Han, and C. Li, "Titanium Dioxide-Based Nanomaterials for Photocatalytic Fuel Generations," *Titan. Dioxide-Based Nanomater. Photocatalytic Fuel Gener.*, vol. 114, pp. 9987–10043, 2014.
- [18] K. Nakata and A. Fujishima, "Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews  $\text{TiO}_2$  photocatalysis: Design and applications," vol. 13, pp. 169–189, 2012.
- [19] P. E. Grattan-Bellew, "Microstructural investigation of deteriorated Portland cement concretes," *Microstruct. Investig. Deterior. Portl. Cem. Concr.*, vol. 10, no. I, pp. 3–16, 1996.
- [20] L. Senff, D. M. Tobaldi, P. Lemes-Rachadel, J. a. Labrincha, and D. Hotza, "The influence of  $\text{TiO}_2$  and ZnO powder mixtures on photocatalytic activity and rheological behavior of cement pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, no. x, pp. 191–200, Aug. 2014.
-

- 
- [21] "Standard Specification for Portland Cement," *ASTM C150 / C150M .Standard Specif. Portl. Cem.*, 2013.
- [22] L. Pinho and M. J. Mosquera, "Photocatalytic activity of  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  nanocomposites applied to buildings: Influence of particle size and loading," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 134–135, pp. 205–221, May 2013.
- [23] L. Graziani, E. Quagliarini, F. Bondioli, and M. D'Orazio, "Durability of self-cleaning  $\text{TiO}_2$  coatings on fired clay brick façades: Effects of UV exposure and wet & dry cycles," *Build. Environ.*, vol. 71, pp. 193–203, Jan. 2014.
- [24] P. Munafò, E. Quagliarini, G. B. Goffredo, F. Bondioli, and A. Licciulli, "Durability of nano-engineered  $\text{TiO}_2$  self-cleaning treatments on limestone," *Constr. Build. Mater.*, vol. 65, pp. 218–231, Aug. 2014.
- [25] I. Ozga, A. Bonazza, E. Bernardi, F. Tittarelli, O. Favoni, N. Ghedini, L. Morselli, and C. Sabbioni, "Diagnosis of surface damage induced by air pollution on 20th-century concrete buildings," *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 28, pp. 4986–4995, 2011.
- [26] O. Rudic, D. Rajnovic, D. Cjepa, S. Vucetic, and J. Ranogajec, "Investigation of the durability of porous mineral substrates with newly designed  $\text{TiO}_2\text{-LDH}$  coating," *Ceram. Int.*, pp. 1–14, Apr. 2015.
- [27] M. K. Hurd, "Cleaning concrete, Concrete. Construction"., p. 5, 1992.
- [28] Y. J. Zhang, L. C. Liu, L. L. Ni, and B. L. Wang, "A facile and low-cost synthesis of granulated blast furnace slag-based cementitious material coupled with  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  catalyst for treatment of dye wastewater," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 138–139, no. x, pp. 9–16, Jul. 2013.
- [29] M. Pérez-Nicolás, J. Balbuena, M. Cruz-Yusta, L. Sánchez, I. Navarro-Blasco, J. M. Fernández, and J. I. Alvarez, "Photocatalytic  $\text{NO}_x$  abatement by calcium aluminate cements modified with  $\text{TiO}_2$ : Improved  $\text{NO}_2$  conversion," *Cem. Concr. Res.*, vol. 70, no. 2, pp. 67–76, Apr. 2015.
- [30] A. Maury-Ramirez, K. Demeestere, and N. De Belie, "Photocatalytic activity of titanium dioxide nanoparticle coatings applied on autoclaved aerated concrete: effect of weathering on coating physical characteristics and gaseous toluene removal.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 211–212, pp. 218–25, Apr. 2012.
- [31] a. Strini, S. Cassese, and L. Schiavi, "Measurement of benzene, toluene, ethylbenzene and oxylene gas phase photodegradation by titanium dioxide dispersed in cementitious materials using a mixed flow reactor," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 90–97, Oct. 2005.
-

- 
- [32] M. Lackhoff, X. Prieto, N. Nestle, F. Dehn, and R. Niessner, "Photocatalytic activity of semiconductor-modified cement — influence of semiconductor type and cement ageing," vol. 43, pp. 205–216, 2003.
- [33] F. Wang, L. Yang, G. Sun, L. Guan, and S. Hu, "The hierarchical porous structure of substrate enhanced photocatalytic activity of TiO<sub>2</sub>/cementitious materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 488–495, Aug. 2014.
- [34] J. Chen, S. Kou, and C. Poon, "Hydration and properties of nano-TiO<sub>2</sub> blended cement composites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, no. 5, pp. 642–649, May 2012.
- [35] J. Chen and C.-S. Poon, "Photocatalytic activity of titanium dioxide modified concrete materials - influence of utilizing recycled glass cullets as aggregates.," *J. Environ. Manage.*, vol. 90, no. 11, pp. 3436–42, Aug. 2009.
- [36] J. O. Carneiro, V. Teixeira, A. J. Martins, M. Mendes, M. Ribeiro, and A. Vieira, "Surface properties of doped and undoped TiO<sub>2</sub> thin films deposited by magnetron sputtering," *Vacuum*, vol. 83, no. 10, pp. 1303–1306, 2009.
- [37] S. Shen, M. Burton, B. Jobson, and L. Haselbach, "Pervious concrete with titanium dioxide as a photocatalyst compound for a greener urban road environment," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 874–883, Oct. 2012.
- [38] A. Folli, C. Pade, T. B. Hansen, T. De Marco, and D. E. Macphee, "TiO<sub>2</sub> photocatalysis in cementitious systems: Insights into self-cleaning and depollution chemistry," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 3, pp. 539–548, Mar. 2012.
- [39] K. Demeestere, J. Dewulf, B. De Witte, A. Beeldens, and H. Van Langenhove, "Heterogeneous photocatalytic removal of toluene from air on building materials enriched with TiO<sub>2</sub>," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 4, pp. 406–414, Apr. 2008.
- [40] R. Zhang, X. Cheng, P. Hou, and Z. Ye, "Influences of nano-TiO<sub>2</sub> on the properties of cement-based materials: Hydration and drying shrinkage," *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, pp. 35–41, 2015.
- [41] M. J. Watts and A. T. Cooper, "Photocatalysis of 4-chlorophenol mediated by TiO<sub>2</sub> fixed to concrete surfaces," vol. 82, pp. 206–211, 2008.
- [42] M. Janus, J. Zatorska, A. Czy, K. Bubacz, E. Kusiak-nejman, and A. W. Morawski, "Applied Surface Science Self-cleaning properties of cement
-

- 
- plates loaded with N , C-modified TiO<sub>2</sub> photocatalysts,” vol. 330, pp. 200–206, 2015.
- [43] L. I. Jing-yi, M. A. Wan-hong, L. E. I. Peng-xiang, and Z. Jin-cai, “Detection of intermediates in the TiO<sub>2</sub> assisted photodegradation of Rhodamine B under visible light irradiation,” vol. 19, pp. 892–896, 2007.
- [44] W. Shen, C. Zhang, Q. Li, W. Zhang, L. Cao, and J. Ye, “Preparation of titanium dioxide nanoparticle modified photocatalytic self-cleaning concrete,” *J. Clean. Prod.*, vol. 87, pp. 762–765, 2015.
- [45] L. Cassar, C. Pepe, G. Tognon, G. L. Guerrini, and R. Amadelli, “White cement for architectural concrete , possessing photocatalytic properties,” 2003.
- [46] B. Ruot, A. Plassais, F. Olive, L. Guillot, and L. Bonafous, “TiO<sub>2</sub> containing cement pastes and mortars: Measurements of the photocatalytic efficiency using a rhodamine B-based colourimetric test,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 10, pp. 1794–1801, Oct. 2009.
- [47] J. Paramés and J. De Brito, “Materiais de construção nanotecnológicos de auto-limpeza Self-cleaning nanotechnologic construction materials,” pp. 55–62, 2010.
- [48] A. M. Ramirez, K. Demeestere, N. De Belie, T. Mäntylä, and E. Levänen, “Titanium dioxide coated cementitious materials for air purifying purposes: Preparation, characterization and toluene removal potential,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 4, pp. 832–838, Apr. 2010.
- [49] E. Sánchez, “Elaboración de materiales base cemento, auto-limpiantes y con baja expansión térmica a temperatura ambiente,” *Tesis Maest. FiC-UANL*, 2013.
- [50] J. A. Velásquez, “Modification of concrete plates with TiO<sub>2</sub> to photocatalytic degradation of water pollutants,” no. 36, pp. 965–970, 2007.
- [51] M. M. Ballari and H. J. H. Brouwers, “Full scale demonstration of air-purifying pavement.,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 254–255, no. 2, pp. 406–14, Jun. 2013.
- [52] W. Liu, S. Wang, J. Zhang, and J. Fan, “Photocatalytic degradation of vehicle exhausts on asphalt pavement by TiO<sub>2</sub>/rubber composite structure,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 81, no. x, pp. 224–232, 2015.
-

- 
- [53] T. Maggos, J. G. Bartzis, P. Leva, and D. Kotzias, "Application of photocatalytic technology for NO<sub>x</sub> removal," *Appl. Phys. A*, vol. 89, no. 1, pp. 81–84, May 2007.
- [54] M. Chen and J.-W. Chu, "NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation on active concrete road surface from experiment to real-scale application," *J. Clean. Prod.*, vol. 19, no. 11, pp. 1266–1272, Jul. 2011.
- [55] J. V. S. de Melo and G. Trichês, "Evaluation of the influence of environmental conditions on the efficiency of photocatalytic coatings in the degradation of nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>)," *Build. Environ.*, vol. 49, pp. 117–123, Mar. 2012.
- [56] J. U. N. Chen and C. Poon, "Photocatalytic Cementitious Materials : Influence of the Microstructure of Cement Paste on Photocatalytic Pollution Degradation," vol. 43, no. 23, pp. 8948–8952, 2009.
- [57] C. Cárdenas, J. I. Tobón, C. García, and J. Vila, "Functionalized building materials: Photocatalytic abatement of NO<sub>x</sub> by cement pastes blended with TiO<sub>2</sub> nanoparticles," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, no. x, pp. 820–825, Nov. 2012.
- [58] L. Senff, D. M. Tobaldi, S. Lucas, D. Hotza, V. M. Ferreira, and J. a. Labrincha, "Formulation of mortars with nano-SiO<sub>2</sub> and nano-TiO<sub>2</sub> for degradation of pollutants in buildings," *Compos. Part B Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 40–47, Jan. 2013.
- [59] I. Tseng, W. Chang, and J. C. S. Wu, "Photoreduction of CO<sub>2</sub> using sol – gel derived titania and titania-supported copper catalysts," vol. 37, pp. 37–48, 2002.
- [60] A. Corma and H. Garcia, "Photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> for fuel production : Possibilities and challenges," *J. Catal.*, vol. 308, pp. 168–175, 2013.
- [61] M. Tahir and N. S. Amin, "Advances in visible light responsive titanium oxide-based photocatalysts for CO<sub>2</sub> conversion to hydrocarbon fuels," *Energy Convers. Manag.*, vol. 76, pp. 194–214, 2013.
- [62] W.-N. Wang, "Comparison of CO<sub>2</sub> Photoreduction Systems: A Review," *Aerosol Air Qual. Res.*, pp. 533–549, 2014.
- [63] K. Koči, "Effect of TiO<sub>2</sub> particle size on the photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub>," *Eff. TiO<sub>2</sub> Part. size photocatalytic Reduct. CO<sub>2</sub>*, vol. 89, pp. 494–502, 2009.
-



- 
- [64] B. Pan, S. Luo, W. Su, and X. Wang, "Applied Catalysis B : Environmental Photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction with H<sub>2</sub>O over LaPO<sub>4</sub> nanorods deposited with Pt cocatalyst," *Applied Catal. B, Environ.*, vol. 168–169, pp. 458–464, 2015.
- [65] G. R. Dey, "Chemical Reduction of CO<sub>2</sub> to Different Products during Photocatalytic Reaction on TiO<sub>2</sub> under Diverse Conditions: an Overview Abstract:," *Chem. Reduct. CO<sub>2</sub> to Differ. Prod. Dur. Photo Catal. React. TiO<sub>2</sub> under Divers. Cond. an Overv.*, vol. 16, pp. 217–226, 2007.
- [66] M. A. Gondal, M. A. Ali, M. A. Dastageer, and X. Chang, "CO<sub>2</sub> Conversion into Methanol Using Granular Silicon Carbide (α6H-SiC): A Comparative Evaluation of 355 nm Laser and Xenon Mercury Broad Band Radiation Sources," *Catal. Letters*, vol. 143, no. 1, pp. 108–117, Oct. 2012.
- [67] Q. D. Truong, J.-Y. Liu, C.-C. Chung, and Y.-C. Ling, "Photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> on FeTiO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> photocatalyst," *Catal. Commun.*, vol. 19, pp. 85–89, Mar. 2012.
- [68] A. Abidov, B. Allabergenov, O. Tursunkulov, L. He, B.-H. Park, H.-J. Kim, and S. Kim, "Methanol Artificial Photosynthesis Using Iron Doped TiO<sub>2</sub>," *J. Biobased Mater. Bioenergy*, vol. 8, no. 2, pp. 165–169, Apr. 2014.
- [69] J. Li, L. Li, L. Zheng, Y. Xian, and L. Jin, "Photoelectrocatalytic degradation of rhodamine B using Ti/TiO<sub>2</sub> electrode prepared by laser calcination method," *Photoelectrocatalytic Degrad. rhodamine B using Ti / TiO<sub>2</sub> electrode Prep. by laser calcination method*, vol. 51, pp. 4942–4949, 2006.
- [70] J. Li, W. Ma, C. Chen, J. Zhao, H. Zhu, and X. Gao, "Photodegradation of dye pollutants on one-dimensional TiO<sub>2</sub> nanoparticles under UV and visible irradiation," vol. 261, pp. 131–138, 2007.
- [71] S. Ke, X. Cheng, Q. Wang, Y. Wang, and Z. Pan, "Preparation of a photocatalytic TiO<sub>2</sub> / ZnTiO<sub>3</sub> coating on glazed ceramic tiles," vol. 40, no. 2, pp. 8891–8895, 2014.
- [72] J. De Dios, J. María, and D. Colorado, "Decontamination through Photocatalytic TiO<sub>2</sub> Additions -Past, Present and Future," pp. 30–31, 2014.
- [73] S. Self-cleaning, L. Pinho, and M. J. Mosquera, "Titania-Silica Nanocomposite Photocatalysts with Application in," pp. 22851–22862, 2011.
-

- 
- [74] S. Ifang, M. Gallus, S. Liedtke, R. Kurtenbach, P. Wiesen, and J. Kleffmann, "Standardization methods for testing photo-catalytic air remediation materials: Problems and solution," *Atmos. Environ.*, vol. 91, pp. 154–161, Jul. 2014.
- [75] M. F. A. Messih, "Journal of Photochemistry and Photobiology A : Chemistry Photocatalytic decolorization of Rhodamine B dye using novel mesoporous SnO<sub>2</sub>–TiO<sub>2</sub> nano mixed oxides prepared by sol gel method," *Journal Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 260, pp. 1–8, 2013.
- [76] L. Biolzi, G. Di Luzio, and J. F. Labuz, "Mechanical properties of photocatalytic white concrete subjected to high temperatures," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 39, pp. 73–81, May 2013.
- [77] M. GÜRBÜZ, "Photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub> coated ceramic tiles," *Anadolu University Anadolu University Journal of Science and Technology Applied Sciences and Engineering.*, vol. 13, pp. 89–94, 2012.
- [78] H. Yamashita, Y. Nishida, S. Yuan, K. Mori, M. Narisawa, Y. Matsumura, T. Ohmichi, and I. Katayama, "Design of TiO<sub>2</sub>–SiC photocatalyst using TiC–SiC nano-particles for degradation of 2-propanol diluted in water," *Catal. Today*, vol. 120, no. 2, pp. 163–167, Feb. 2007.
- [79] Y. Li, Z. Yu, J. Meng, and Y. Li, "Enhancing the activity of a SiC–TiO<sub>2</sub> composite catalyst for photo-stimulated catalytic water splitting," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 10, pp. 3898–3904, Apr. 2013.
- [80] C. Gómez-Solís, I. Juárez-Ramírez, E. Moctezuma, and L. M. Torres-Martínez, "Photodegradation of indigo carmine and methylene blue dyes in aqueous solution by SiC–TiO<sub>2</sub> catalysts prepared by sol-gel.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 217–218, pp. 194–9, May 2012.
- [81] I. Juárez-Ramírez, E. Moctezuma, L. M. Torres-Martínez, and C. Gómez-Solís, "Short time deposition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on SiC as photocatalysts for the degradation of organic dyes," *Res. Chem. Intermed.*, vol. 39, no. 4, pp. 1523–1531, Jun. 2012.
- [82] N. Keller, V. Keller, F. Garin, and M. J. Ledoux, "A new TiO<sub>2</sub>–β-SiC material for use as photocatalyst," *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 6, pp. 970–974, Feb. 2004.
- [83] A. N. Kouamé, R. Masson, D. Robert, N. Keller, and V. Keller, "β-SiC foams as a promising structured photocatalytic support for water and air detoxification," *Catal. Today*, vol. 209, pp. 13–20, Jun. 2013.
-

- 
- [84] J. Mao, T. Peng, X. Zhang, K. Li, and L. Zan, "Selective methanol production from photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> on BiVO<sub>4</sub> under visible light irradiation," *Catal. Commun.*, vol. 28, pp. 38–41, Nov. 2012.
- [85] K. Pemartin, C. Solans, J. Alvarez-Quintana, and M. Sanchez-Dominguez, "Synthesis of Mn–Zn ferrite nanoparticles by the oil-in-water microemulsion reaction method," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, vol. 451, pp. 161–171, Jun. 2014.
- [86] M. Cabinets, M. Rooms, B. Statements, and D. Mass, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars ( Using 2-in . or [ 50-mm ] Cube Specimens ) 1," pp. 1–9.
- [87] M. A. Soto-Borbón, "CHARACTERIZATION OF TiO<sub>2</sub>/ALGINATE SCREENPRINTING FILMS," *Rev. Mex. Ing. Química*, vol. 13, pp. 227–236, 2014.
- [88] G. Jorge, U. Iberoamericana, D. Ing, C. Quimicas, P. P. Reforma, O. Solorza, D. De Quimica, A. Postal, and E. Gomez-del-campo, "Preparation of Semiconducting Materials in the Laboratory," 1990.
- [89] U. P. Morales, E. V. López, and C. O. Otálora, "BASIC ASPECTS IN THE INTERPRETATION OF THE DIAGRAMS OF ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE," pp. 13–19, 2010.
- [90] A. Kleiman, M. L. Vera, A. Márquez, and M. Litter, "Estudio de la actividad fotocatalítica de películas de dióxido de titanio en fase anatasa," vol. 1, no. 3, pp. 1017–1021, 2009.
- [91] Karina Araceli Cabriaes Gómez and Juan Antonio Garib Aguilar, "Síntesis de nanopartículas de β-SiC mediante microondas," vol. XVII, no. 63, pp. 17–30, 2014.
- [92] M. Olivares, "Evaluation of concrete mechanical strength through porosity." p. 14, 2003.
- [93] S. S. Lucas, V. M. Ferreira, and J. L. B. de Aguiar, "Incorporation of titanium dioxide nanoparticles in mortars — Influence of microstructure in the hardened state properties and photocatalytic activity," *Cem. Concr. Res.*, vol. 43, pp. 112–120, Jan. 2013.
- [94] "UNI 11259 Determination of the photocatalytic activity of hidraulic binders: rodammina test method. Milan: UNI." 2008.
- [95] C. Cardenas, "Photocatalytic properties evaluation of Portland white cement added," *Rev. Lat. Met. Mat.*, vol. 33, no. 2, pp. 316–322, 2012.
-

- 
- [96] T. Vulic, M. Hadnadjev-kostic, O. Rudic, M. Radeka, R. Marinkovic-neducin, and J. Ranogajec, "Cement & Concrete Composites Improvement of cement-based mortars by application of photocatalytic active Ti – Zn – Al nanocomposites," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 36, pp. 121–127, 2013.
- [97] P. Wilhelm and D. Stephan, "Photodegradation of rhodamine B in aqueous solution via SiO<sub>2</sub>@TiO<sub>2</sub> nano-spheres," *J. Photochem. Photobiol. A Chem.*, vol. 185, no. 1, pp. 19–25, Jan. 2007.
- [98] Z. He, C. Sun, S. Yang, Y. Ding, H. He, and Z. Wang, "Photocatalytic degradation of rhodamine B by Bi(2)WO(6) with electron accepting agent under microwave irradiation: mechanism and pathway.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 162, no. 2–3, pp. 1477–86, Mar. 2009.
- [99] T. Wu, G. Liu, J. Zhao, and N. Serpone, "Photoassisted Degradation of Dye Pollutants . V . Self-Photosensitized Oxidative Transformation of Rhodamine B under Visible Light Irradiation in Aqueous TiO<sub>2</sub> Dispersions," vol. 5647, no. 1, pp. 5845–5851, 1998.
- [100] N. L. Alchapar, "Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana," *Ambient. construído, Porto Alegre*, vol. 12, pp. 107–123, 2012.
- [101] T. Zou, C. Xie, Y. Liu, S. Zhang, Z. Zou, and S. Zhang, "Full mineralization of toluene by photocatalytic degradation with porous TiO<sub>2</sub>/SiC nanocomposite film," *J. Alloys Compd.*, vol. 552, pp. 504–510, Mar. 2013.
- [102] S. Banerjee, D. D. Dionysiou, and S. C. Pillai, "Applied Catalysis B : Environmental Self-cleaning applications of TiO<sub>2</sub> by photo-induced hydrophilicity and photocatalysis," *Applied Catal. B, Environ.*, vol. 176–177, pp. 396–428, 2015.
- [103] P. Usubharatana, D. Mcmartin, A. Veawab, P. Tontiwachwuthikul, F. Engineering, V. Uni, and S. S. Canada, "Photocatalytic Process for CO<sub>2</sub> Emission Reduction from Industrial Flue Gas Streams," no. 1, pp. 2558–2568, 2006.
- [104] L. Matějová, K. Kočí, M. Reli, L. Čapek, A. Hospodková, P. Peikertová, Z. Matěj, L. Obalová, A. Wach, P. Kuśtrowski, and A. Kotarba, "Preparation, characterization and photocatalytic properties of cerium doped TiO<sub>2</sub>: On the effect of Ce loading on the photocatalytic reduction of carbon dioxide," *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 152–153, pp. 172–183, Jun. 2014.
-

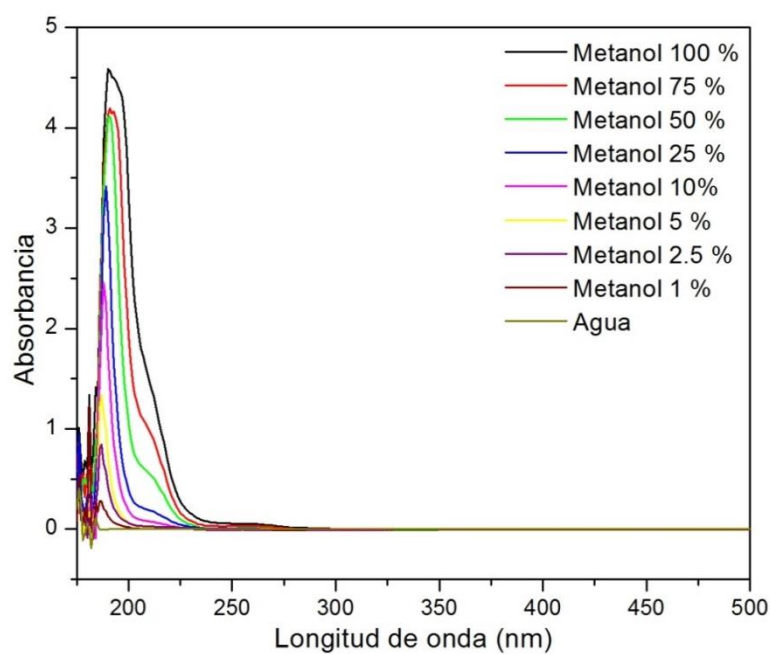
- 
- [105] G. M. Madhu, M. A. L. A. Raj, and K. V. K. Pai, "Titanium oxide (  $\text{TiO}_2$  ) assisted photocatalytic degradation of methylene blue," vol. 30, no. 2, pp. 259–264, 2009.
- [106] S. Neațu, J. A. Maciá-Agulló, and H. Garcia, "Solar light photocatalytic  $\text{CO}_2$  reduction: general considerations and selected bench-mark photocatalysts.," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 15, no. 4, pp. 5246–62, Jan. 2014.
- [107] M. Abou Asi, C. He, M. Su, D. Xia, L. Lin, H. Deng, Y. Xiong, R. Qiu, and X. Li, "Photocatalytic reduction of  $\text{CO}_2$  to hydrocarbons using  $\text{AgBr/TiO}_2$  nanocomposites under visible light," *Catal. Today*, vol. 175, no. 1, pp. 256–263, Oct. 2011.
- [108] G. Mele, C. Annese, L. D'Accolti, A. De Riccardis, C. Fusco, L. Palmisano, A. Scarlino, and G. Vasapollo, "Photoreduction of carbon dioxide to formic acid in aqueous suspension: a comparison between phthalocyanine/ $\text{TiO}_2$  and porphyrin/ $\text{TiO}_2$  catalysed processes.," *Molecules*, vol. 20, no. 1, pp. 396–415, Jan. 2015.
- [109] B. Tahir, M. Tahir, and N. S. Amin, "Gold–indium modified  $\text{TiO}_2$  nanocatalysts for photocatalytic  $\text{CO}_2$  reduction with  $\text{H}_2$  as reductant in a monolith photoreactor," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 338, pp. 1–14, May 2015.
- [110] A. Ahmad Beigi, S. Fatemi, and Z. Salehi, "Synthesis of nanocomposite  $\text{CdS/TiO}_2$  and investigation of its photocatalytic activity for  $\text{CO}_2$  reduction to  $\text{CO}$  and  $\text{CH}_4$  under visible light irradiation," *J.  $\text{CO}_2$  Util.*, vol. 7, pp. 23–29, Sep. 2014.
- [111] X. Li, J. Wen, J. Low, Y. Fang, and J. Yu, "Design and fabrication of semiconductor photocatalyst for photocatalytic reduction of  $\text{CO}_2$  to solar fuel," vol. 57, no. 1, 2014, pp. 70–100.

---

## APENDICE

### Curva de calibración de metanol

Para relacionar la absorbancia del metanol con la concentración del mismo, se elaboró una curva de calibración. Para realizar la curva de calibración se partió del metanol puro, que posteriormente se diluyó a concentraciones de 75, 50, 25, 10, 5, 2.5 y 1%. De cada una de estas soluciones se obtuvo un espectro de absorción en el intervalo de longitud de onda de 175 a 500 nm.



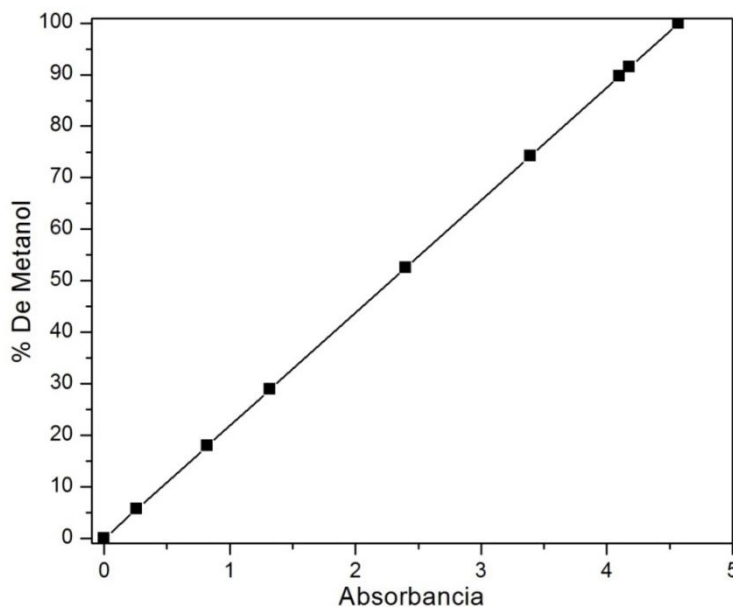
Curva de calibración de metanol

---

Como era de esperarse, conforme la concentración del metanol disminuye, también lo hacen las curvas de absorbancia. En la curva de calibración también puede apreciarse que el pico de la absorbancia del metanol se encuentra cercano a los 200 nm.

También se aprecia que cuando la concentración es de 75 y 50 % se obtienen valores de absorbancia muy similares entre si y conforme disminuye el porcentaje se observa una disminución más marcada.

Se eligieron los valores de máxima absorbancia de las diferentes concentraciones de metanol y se graficaron tomando el porcentaje de la solución como una función de la absorbancia. Los puntos de la gráfica se ajustaron a una recta de calibración de metanol en función de absorbancia en un intervalo del 0 al 100% de metanol.



Variación del % de metanol con la absorbancia del metanol.